

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть I МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Под редакцией проф. В. Е. Китаева

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР в качестве учеб-
ного пособия для учащихся электромеханических
специальностей техникумов



ББК 31.261
К45
УДК 621.313(075)

Рецензенты:

Г. К. Салгус (МЭИ);
Новочеркасский электромеханический техникум

Китаев В. Е., Корхов Ю. М., Свирин В. К.
К45 Электрические машины. Ч. 1. Машины постоянного тока.
Трансформаторы: Учебное пособие для техникумов / Под ред.
В. Е. Китаева.— М.: Высш. школа, 1978.— 184 с., ил.

40 к.

В книге излагаются теории машин постоянного и переменного тока: асинхронных бесколлекторных машин, синхронных машин, коллекторных машин переменного тока и преобразователей; содержатся сведения по теории машин переменного тока, их принцип действия, устройство и современные конструкции; рассматриваются физические процессы, происходящие при работе электрических машин переменного тока; устанавливаются количественные соотношения между величинами, характеризующими эти процессы.

Предназначается для учащихся электромеханических специальностей техникумов. Может быть полезна специалистам, работающим в области производства и эксплуатации электрических машин и трансформаторов.

К $\frac{30307-421}{001(01)-78}$ 219—78

ББК 31.261
СП2.1.081

В настоящее время значительное развитие получило электромашиностроение как одна из ведущих отраслей электропромышленности. Основными направлениями развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы, утвержденными XXV съездом КПСС, предусмотрено быстрыми темпами развивать производство электрических машин и трансформаторов как малой, так и большой мощности, намечено освоить производство таких гигантов-машин, как турбогенераторов мощностью 1000—1200 тыс. кВт для атомных и тепловых электростанций, генераторов мощностью 640 тыс. кВт для гидроэлектростанций.

Содержание пособия соответствует программе курса «Электрические машины», утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования СССР для студентов техникумов электромеханических специальностей. В нем рассматривают машины постоянного тока, трансформаторы, общие вопросы машин переменного тока, асинхронные машины, синхронные машины, коллекторные машины переменного тока и преобразователи. Во введении изложены общие сведения об электрических машинах и трансформаторах, областях их применения, сведения о проводниковых, магнитных и изоляционных материалах; дано краткое описание истории развития электромашиностроения и задачи, стоящие перед ним. Содержатся сведения по теории электрических машин и трансформаторов; рассматриваются принципы действия, конструкции; описываются машины и трансформаторы специальных типов; приводятся количественные соотношения, характеризующие физические процессы, происходящие при работе электрических машин и трансформаторов.

Материал между авторами распределяется следующим образом: гл. 1—9 написаны Свириным В. К., введение и гл. 10—26, 36—37 — Китаевым В. Е., гл. 27—35 и 38 — Корховым Ю. М.

Авторы признательны доц. Г. К. Салгусу и коллективу Новочеркасского электромеханического техникума за ценные советы, высказанные в процессе рецензирования данного учебника.

Все замечания и предложения по книге просим направлять по адресу: Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

§ В.1. Краткие исторические сведения об электрических машинах и трансформаторах

Электромашиностроение начало развиваться с середины XIX в. Исследования электромагнитных полей, проведенные в то время учеными, позволили приступить к созданию моделей для практического применения.

Выдающееся значение имели работы французского физика А. Ампера, английского физика М. Фарадея и русских ученых Э. Ленца, Б. Якоби и М. О. Доливо-Добровольского, работы которого дали мощный толчок использованию переменного тока. К началу XX в. стали вполне очевидными достоинства и широкие возможности использования в народном хозяйстве электрической энергии. Были доказаны и практически реализованы такие замечательные свойства электрической энергии, как простота выработки, преобразование, трансформация, распределение и передача на большие расстояния.

Продолжительный период времени электрический генератор и электрический двигатель развивались независимо друг от друга, и только в 70-х годах XIX в. пути их развития объединились.

Электрическая машина постоянного тока прошла четыре этапа развития:

- 1) магнитоэлектрические машины с постоянными магнитами;
- 2) машины с электромагнитами с независимым возбуждением;
- 3) электрические машины с самовозбуждением и элементарными якорями;
- 4) электрические машины с усовершенствованными якорями и многополюсными системами.

Начальный период развития электрических машин связан главным образом с постоянным током. Объясняется это тем, что потребителями электрической энергии являлись установки, работающие исключительно на постоянном токе (дуговые лампы, установки гальванопластики и др.).

Развитие электрических железных дорог значительно увеличило спрос на электродвигатели и генераторы.

В 80-х годах прошлого столетия возникла необходимость передавать электроэнергию на расстояние. В 1882 г. были проведены первые опыты по передаче электроэнергии на постоянном токе. Однако высокое напряжение в генераторах постоянного тока ухудшало работу коллектора и часто приводило к авариям.

Большая заслуга в развитии переменного тока принадлежит русскому ученому П. Н. Яблочкову, который в 1876 г. применил трансформатор для питания изобретенных им электрических свечей. Трансформатор П. Н. Яблочкова имел незамкнутый сердечник. Трансформаторы с замкнутым магнитопроводом, применяемым в настоящее время, появились значительно позднее, в 1884 г. С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току, который до этого времени не имел применения.

Выдающийся русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский в 1889 г. предложил трехфазную систему переменного тока, построил первый трехфазный асинхронный двигатель и первый трехфазный трансформатор. На электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне в 1891 г. М. О. Доливо-Добровольский демонстрировал опытную высоковольтную электропередачу переменного тока протяженностью 175 км (местечко Лауфен во Франкфурте-на-Майне). Трехфазный генератор имел мощность 230 кВт·А при напряжении 95 В. При помощи трехфазных трансформаторов напряжение генератора в Лауфене повышалось до 15 кВ и понижалось во Франкфурте-на-Майне до 65 В (фазного значения), при котором осуществлялось питание трехфазного асинхронного двигателя для насосной установки мощностью 75 кВт. При дальнейших опытах напряжение в линии электропередачи повышалось до 28 кВ посредством последовательного включения обмоток высшего напряжения двух трансформаторов. Коэффициент полезного действия (к. п. д.) электропередачи был 77,4% и считался тогда высоким. В дальнейшем начали применять масляные трансформаторы, так как было установлено, что масло — хороший изолятор и хорошая охлаждающая среда для трансформаторов.

Последнее столетие характеризуется быстрым ростом промышленности и транспорта на базе электрификации. К трансформаторам и электрическим машинам предъявлялись более высокие требования: повышение экономичности, уменьшения массы и габаритов. Проводилась большая работа по изучению электромагнитных и тепловых процессов, происходящих при работе трансформаторов и электрических машин, изысканию новых изоляционных материалов и улучшению свойств электротехнической стали.

В царской России не было своей трансформаторно- и электромашиностроительной промышленности, а имевшиеся заводы принадлежали иностранным фирмам и по существу являлись мастерскими, где машины и трансформаторы собирались из частей, привозимых из-за границы.

После Великой Октябрьской социалистической революции открылась возможность для развития отечественного электро-, машино- и трансформаторостроения. Осуществление плана ГОЭЛРО (1920 г.) требовало производства новых, более совершенных трансформаторов и электрических машин. Советская электропромышленность за короткий промежуток времени прошла путь, который зарубежная техника проходила в течение почти полувека. Быстро осваивая новые типы машин, широко внедряя в производство со-

циалистические формы труда, электромашиностроительная промышленность СССР на базе широкого планирования качественно и количественно достигла уже к концу второй пятилетки уровня за рубежом.

Основными принципами советской электроэнергетики являются:

- 1) плановый характер ее развития;
- 2) централизованная выработка электроэнергии на районных электрических станциях;
- 3) сооружение электрических станций на местных и низкокалорийных видах топлива и мощных гидроэлектростанциях;
- 4) создание и развитие мощных электроэнергетических систем, связанных для совместной работы высоковольтными линиями передач.

Эти принципы были положены в основу исторического плана ГОЭЛРО. По этому плану предполагалось в течение 10÷15 лет построить тридцать электростанций с суммарной установленной мощностью 1700 МВт. План ГОЭЛРО был выполнен досрочно к 1 января 1931 г.

В период Великой Отечественной войны темпы развития энергетики и электрификации были заметно сокращены, некоторые электротехнические заводы были эвакуированы в восточные районы страны, а другие оказались в блокаде (Ленинград) или на оккупированной территории. В послевоенный период началось быстрое восстановление и развитие районных электростанций и электротехнических заводов, была произведена модернизация и реконструкция старых заводов, построен целый ряд новых для массового производства серийных электрических машин и для крупного электромашиностроения. Соответственно началось резкое повышение производства электроэнергии, которое по сравнению с предвоенным 1940 г. к 1950 г. возросло в два раза, к 1960 г. — в шесть раз.

В СССР строятся самые мощные в мире электрические машины, основные показатели которых (к. п. д., масса, габариты и др.) не уступают лучшим образцам иностранных фирм. Отечественные машины отличаются высокой надежностью в работе. В настоящее время изготавливают генераторы мощностью 500 и 1200 МВт и разрабатывают генераторы мощностью 1600 и 2000 МВт, не имеющие себе равных в мире. Заводы выпускают трансформаторы различных мощностей и конструкций: освоено производство трансформаторов на напряжение 750 кВ, осваиваются трансформаторы мощностью 800—1000 мВ·А, разрабатываются на напряжения 1000—1200 кВ.

XXV съезд КПСС утвердил «Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг.». Для осуществления решений XXV съезда КПСС в области электроэнергетической промышленности необходимо обеспечить в 1980 г. производство 1340÷÷1380 млрд. кВт·ч электроэнергии; ввести в действие мощности на электростанциях в размере 67—70 млн. кВт, в том числе на атомных — 13—15 млн. кВт; продолжить строительство тепловых

электростанций мощностью 4—6 млн. кВт; быстрыми темпами развивать производство крупных электрических машин, электромашин малой мощности, высоковольтной и низковольтной электрической аппаратуры; освоить производство турбогенераторов мощностью 1000—1200 тыс. кВт для атомных и тепловых электростанций, генераторов мощностью 640 тыс. кВт для гидроэлектростанций, комплексов высоковольтного оборудования для линий электропередач постоянного тока напряжением до 1500 кВ и переменного тока напряжением до 1150 кВ; автоматизированных электроприводов с полупроводниковыми преобразователями для прокатных станов, электрооборудования для мощных металлургических установок и агрегатов; высокопроизводительного и надежного электрооборудования для бурения нефтяных и газовых скважин, откачки нефти, для газопроводов и нефтепроводов, механизированных комплексов по добыче угля; грузовых магистральных электровозов мощностью свыше 10 тыс. л. с.; систем электропривода для оборудования по переработке и хранению сельскохозяйственной продукции, для животноводческих ферм и гидромелиоративных сооружений; новых видов электрокабельных изделий, рассчитанных на повышение напряжения, и теплостойких проводов; высокомоментных и силовых шаговых электродвигателей для металлообрабатывающего оборудования с числовым программным управлением.

§ В.2. Общие сведения об электрических машинах и трансформаторах

Электрическая машина, действие которой основано на использовании явления электромагнитной индукции, предназначена для преобразования механической энергии в электрическую, или электрической в механическую, или электрической энергии в электрическую энергию другого рода тока, другого напряжения, другой частоты.

Электрическую машину, преобразующую механическую энергию в электрическую, называют *генератором*. Вся электрическая энергия производится генераторами переменного тока (синхронными), установленными на электростанциях. Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется двигателями. Любая электрическая машина может быть использована как в качестве генератора, так и в качестве двигателя. Свойство электрических машин изменять направление преобразуемой энергии называют *обратимостью*.

Если в магнитном поле полюсов постоянных магнитов или электромагнитов (рис. В.1) N и S поместить проводник и под действием какой-либо силы F_1 перемещать его, то в нем возникнет э. д. с.

$$e = Blv \sin \alpha = Blv,$$

где B — магнитная индукция в месте нахождения проводника; l — активная длина проводника (его часть, находящаяся в магнитном

поле); v — скорость перемещения проводника в магнитном поле; α — угол между векторами максимума магнитной индукции и скоростью перемещения проводника (в рассматриваемом случае $\alpha = \pi/2$, т. е. $\sin \alpha = 1$).

Направление э. д. с., индуцируемой в проводнике, определяется согласно правилу правой руки (от зрителя за плоскость чертежа). Если проводник замкнуть на какое-либо сопротивление приемника энергии, то в образовавшейся цепи под действием э. д. с. протекает ток I , направление которого совпадает с направлением э. д. с. проводника. В результате взаимодействия тока проводника с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила $F_{\text{эм}} = IBl$,

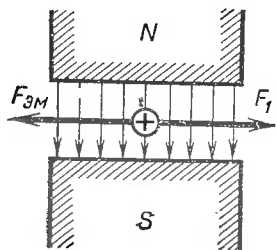


Рис. В.1. Принцип действия электрической машины

направление которой определяется по правилу левой руки. Эта сила направлена встречно силе F_1 и при $F_{\text{эм}} = F_1$ проводник перемещается с постоянной скоростью. Таким образом, механическая энергия, затрачиваемая на перемещение проводника, преобразуется в электрическую, отдаваемую сопротивлению внешнего приемника электрической энергии, т. е. машина будет работать в режиме генератора.

Если от постороннего источника электрической энергии через проводник пропустить ток, то в результате взаимодействия тока в проводнике и магнитного поля полюсов создается электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$, под действием которой проводник начнет перемещаться в магнитном поле, преодолевая силу торможения какого-либо механического приемника энергии, т. е. машина будет работать как двигатель. Таким образом, в силу общности законов электромагнитной индукции и электромагнитных сил любая электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Электрические машины подразделяют на машины постоянного и переменного тока. В машинах переменного тока возникает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого зависит от частоты тока сети.

Любая электрическая машина состоит из двух основных частей: неподвижной — статора, и вращающейся — ротора.

Машины переменного тока можно подразделять на однофазные и многофазные (обычно трехфазные), а в зависимости от принципа действия — на синхронные и асинхронные. В синхронных машинах процесс преобразования энергии происходит при синхронной скорости, т. е. при частоте вращения ротора, равной частоте вращения магнитного поля. Синхронные машины широко применяют в качестве генераторов, и вся вырабатываемая электрическая энергия производится генераторами этого типа. Применение синхронных двигателей ограничивается относительно небольшим кругом специальных назначений (постоянство частоты, повышение $\cos \varphi$ и др.). В асинхронных машинах процесс преобразования энергии

присходит при несинхронной (асинхронной) частоте, т. е. при частоте вращения ротора, не равной частоте вращения магнитного поля. В силу ряда существенных достоинств асинхронные машины, применяемые в качестве двигателей, являются наиболее распространенным типом электрических машин.

Кроме синхронных и асинхронных машин переменного тока применяют коллекторные машины, используемые в качестве двигателей переменного тока и допускающие экономичное регулирование скорости в широких пределах, у которых регулировочные характеристики близки к характеристикам двигателей постоянного тока.

Электрические машины, применяемые для преобразования электрической энергии в электрическую энергию другого рода тока (другого напряжения, числа фаз, частоты), называют *преобразователями*. Электрические машины, используемые в качестве регуляторов и усилителей электромеханических сигналов, называют соответственно *электромашинными регуляторами и усилителями*.

К электрическим машинам в силу общности физических явлений относят *трансформатор*, являющийся статическим электромагнитным преобразователем переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Принцип работы трансформатора основан на использовании явления взаимоиндукции между двумя (или несколькими) обмотками, помещенными на замкнутом стальном магнитопроводе. Трансформаторы применяют при передаче электрической энергии на большие расстояния и распределении ее между потребителями, а также в различных преобразовательных, измерительных, защитных и других устройствах.

§ В.3. Материалы, применяемые для электрических машин и трансформаторов

При изготовлении электрических машин и трансформаторов используют материалы, которые можно подразделить на активные, изоляционные и конструкционные.

Активные материалы. Такими материалами являются магнитные и проводниковые (токопроводящие), обеспечивающие нормальное протекание электромагнитных процессов при работе электрических машин и трансформаторов. К проводниковым материалам относят прежде всего медь, обладающую малым удельным сопротивлением. Из меди изготовляют контактные кольца и коллекторные пластины. Наряду с медью применяют алюминий, а в некоторых случаях сплавы латуни и бронзы. Из меди и алюминия изготовляют провода круглого и прямоугольного сечений для обмоток электрических машин и трансформаторов.

В качестве магнитных материалов для сердечников электрических машин и трансформаторов применяют электротехнические стали различных марок (ГОСТ 802—58), буквы и цифры которых означают следующее: б ква Э — сталь электротехническая; первая

цифра после буквы — степень легированности стали (1 — слаболегированная, 2 — среднелегированная, 3 — повышено-легированная, 4 — высоколегированная); вторая цифра — гарантированные электромагнитные свойства стали (1 — нормальные, 2 — пониженные и 3 — низкие удельные потери в стали при частоте 50 Гц; 4 — нормальные удельные потери при частоте 400 Гц; 5 — нормальную и 6 — повышенную магнитную проницаемость в полях менее 0,01 А/см; 7 — нормальную и 8 — повышенную магнитную проницаемость в полях от 0,1 до 1 А/см; 0 — сталь холоднокатаная); буква А после цифры — особонизкие удельные потери. Например, сталь Э330А означает сталь повышенного легирования, холоднокатаная, с особо низкими удельными потерями.

Потери в стали магнитопровода складываются из потерь на вихревые токи и гистерезис (перемагничивание стали). Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы трансформаторов и электрических машин изготавливают из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Изоляционные прослойки, оказывая вихревым токам чрезвычайно большое сопротивление, ограничивают сферу действия токов небольшими участками и тем самым значительно уменьшают потери электрической энергии. Кроме того, для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы составляют из листов высоколегированной стали, удельное электрическое сопротивление которой значительно больше, чем у обычной стали.

Потери на гистерезис и вихревые токи

$$P_{\text{ст}} = p G_{\text{ст}},$$

где p — коэффициент удельных потерь, зависящий от марки стали, толщины стальных листов, частоты и максимальной магнитной индукции, Вт/кг; $G_{\text{ст}}$ — масса магнитопровода, кг.

Холоднокатаная сталь отличается от горячекатаной не только меньшими потерями, но и высокой магнитной проницаемостью, величина которой зависит от направления магнитных линий. По направлению проката (вдоль) магнитная проницаемость холоднокатаной стали больше в направлении, перпендикулярном направлению проката, магнитная проницаемость меньше, чем магнитная проницаемость горячекатаной стали. Поэтому стремятся выполнять магнитопроводы электрических машин и трансформаторов так, чтобы их магнитный поток замыкался вдоль направления проката стальных листов или ленты. Применение стали с более высокой магнитной проницаемостью позволяет повысить магнитную индукцию и уменьшить сечение магнитопровода и его массу.

Изоляционные материалы. Это — одни из основных элементов электрической машины и трансформатора, так как надежность их работы в большой степени зависит от качества изоляции. Изоляция должна обеспечивать надежную работу электрической машины или трансформатора в условиях эксплуатации при значительных колебаниях температуры. В зависимости от нагревостойкости изоляционные материалы (ГОСТ 8865—70) разделяют на классы со сле-

поверхности предельно допустимыми температурами: класс $У$ — 90°C , класс A — 105°C , класс E — 120°C , класс B — 130°C , класс F — 155°C , класс H — 180°C , класс C — более 180°C .

К классу $У$ относят не пропитанные и не погруженные в жидкий диэлектрик волокнистые электроизоляционные материалы из целлюлозы или шелка, а также полимерные органические диэлектрики (полиэтилен, полистирол и др.) с температурой размягчения не ниже 90 — 100°C . К классу A — волокнистые электроизоляционные материалы из целлюлозы или шелка, пропитанные или погруженные в жидкий диэлектрик; изоляцию эмальпроводов на основе масляных или полиамидных лаков; дерево и древесные слоистые пластины. Пропитывающими веществами для материалов класса A являются трансформаторное масло, масляные лаки, битумные составы. К классу E — литые составы; изоляцию эмальпроводов на основе поливинилацетатных, полиэфирных, эпоксидных и полиуретановых смол и синтетические материалы. К классу B — электроизоляционные материалы, изготовленные на основе неорганических диэлектриков (слюда, асбест, волокнистое стекло), пропитанных лаками или смолами повышенной нагревостойкости, а также пластмассы с неорганическим наполнителем. К классу F — электроизоляционные материалы, изготовленные на основе неорганических диэлектриков и пропитанные лаками или смолами, модифицированными кремнийорганическими соединениями. К классу H — неорганические электроизоляционные материалы, пропитанные кремнийорганическими лаками или смолами. Такие материалы не содержат связывающих органических материалов с нагревостойкостью ниже 180°C . К классу C — неорганические изоляционные материалы, изготовленные без применения органических связывающих устройств.

Конструкция обмоток электрических машин и трансформаторов должна обеспечивать их хорошее охлаждение с тем, чтобы температура нагрева не превышала пределов, установленных для соответствующих классов изоляции. При нормальной работе электрической машины или трансформатора изоляция обмоток должна выдерживать длительное воздействие переменного электрического поля, кратковременные перенапряжения, возникающие в условиях эксплуатации, механические воздействия, которым она подвергается в процессе сборки, в условиях эксплуатации и при коротких замыканиях (к. з.).

Конструкционные материалы. Их применяют для изготовления тех частей и деталей электрических машин и трансформаторов, которые служат главным образом для передачи и восприятия механических воздействий. В электрических машинах применяются в основном чугун, сталь, цветные металлы и их сплавы и пластмассы. В настоящее время чугун (простой, ковкий) применяют для магнитопроводов редко, вследствие плохих магнитных свойств, сталь же (литую, кованую) применяют для магнитопроводов станин машин постоянного тока, ободов роторов синхронных машин и др.

§ В.4. Нагревание и охлаждение электрических машин и трансформаторов

Режим работы электрической машины или трансформатора при условиях, для которых они предназначены заводом-изготовителем, называют *номинальным*. Такой режим характеризуется номинальными величинами, указанными на заводском щитке машины или трансформатора. Обычно электрические машины и трансформаторы предназначены для продолжительного режима работы, при котором они могут работать с установившимися превышениями температуры их отдельных частей над температурой окружающей среды, не превосходящими допускаемых общесоюзными стандартами.

При работе электрических машин и трансформаторов возникают потери преобразуемой ими энергии. Эти потери складываются из следующих видов:

- 1) электрические (потери в обмотках), идущие на нагревание протекающими токами проводов обмоток, сопротивлений переходных контактов на коллекторе или контактных колец;
- 2) гистерезисные, возникающие в перемагничиваемых ферромагнитных частях машин или трансформатора;
- 3) потери на вихревые токи в частях машин и трансформаторов, находящихся в переменных магнитных полях. Обычно потери на гистерезис и вихревые токи оцениваются совместно, как потери в стали, которые зависят от марки стали, толщины листов или ленты, качества изоляции, частоты перемагничивания и магнитной индукции;
- 4) механические, идущие на трение в подшипниках, о воздух (или газ), вращающихся частей машины, щеток о коллектор или контактные кольца;
- 5) потери, затрачиваемые на вращение вентилятора, расположенного на валу машины.

Помимо перечисленных потерь возникают еще дополнительные вследствие неравномерности распределения магнитных полей и токов, а при высоких напряжениях — диэлектрические.

Возникающие при работе электрических машин и трансформаторов потери энергии превращаются в теплоту, нагревая отдельные их части. Теплота должна быть рассеяна в окружающую среду, чтобы температура отдельных частей электрических машин и трансформаторов не превышала допустимых пределов.

По способу охлаждения электрические машины подразделяются на:

- 1) машины с естественным охлаждением, не имеющие специальных устройств для охлаждения. Такие машины бывают малой мощности, так как отвод тепла в них малоинтенсивен;
- 2) машины с самовентиляцией, на валу которых помещают вентилятор, всасывающий или нагнетающий в машину при вращении ротора воздух и прогоняющий его через внутреннюю полость машины.

В зависимости от того, в каком направлении движется охлаждающий воздух по телу ротора, различают две основные системы вентиляции: радиальную и осевую. При радиальной вентиляции охлаждающая среда перемещается в радиальном направлении от вала к периферии ротора через промежутки между пакетами стальных листов, образующих сердечник ротора. При осевой вентиляции в сердечнике ротора устраивают осевые каналы, сквозь которые прогоняется воздух параллельно валу машины. Радиальная система вентиляции проста в конструктивном отношении и надежна, потери энергии на вентиляцию малы и теплоотдача равномерна. Однако она некомпактна и неустойчива в отношении количества протекающего через машину воздуха. В машинах малой и частично средней мощности лучшие результаты дает осевая вентиляция, а в машинах средней и большой мощности — радиальная.

3) машины с посторонним охлаждением, в которых охлаждающий воздух (или водород) прогоняется по трубам вентилятором. Такое охлаждение применяют для машин большой мощности.

В трансформаторах используется воздушное (в сухих) и масляное охлаждение. В сухих трансформаторах нагретые поверхности обмоток и магнитопровода отдают тепло омываемому их воздуху путем конвекции и излучения. В масляных трансформаторах тепловая энергия передается в окружающую среду специальным трансформаторным маслом, заливаемым в металлический бак, в котором помещен трансформатор. Трансформаторное масло является хорошей охлаждающей средой и хорошим изоляционным материалом, который обеспечивает высокую электрическую прочность трансформатора при сравнительно малых изоляционных промежутках. Последнее свойство позволяет создавать компактные конструкции обмоток и магнитопровода, а масляное охлаждение дает возможность применять более высокие электромагнитные нагрузки активных материалов (плотности тока и магнитной индукции) и делать трансформаторы с малой массой этих материалов.

По способу защиты от влияния внешней среды различают открытое, защищенное, брызгозащищенное, водозащищенное, герметическое и взрывобезопасное исполнения машин. *Открытой* считается машина, у которой вращающиеся и токоведущие части не имеют защитных приспособлений. В *защищенной* машине есть специальные защитные приспособления, препятствующие проникновению внутрь машины посторонних предметов, а также защищающие от случайных прикосновений к токоведущим или вращающимся частям. В *брызгозащищенной* машине есть специальные защитные приспособления, предохраняющие от попадания внутрь водяных капель, падающих сверху под углом до 45° к вертикали. *Водозащищенной* считается машина, закрытая со всех сторон (негерметически плотно) и выдерживающая испытание обливанием струей воды. В *герметической* машине плотно закрытый корпус не допускает проникновения влаги внутрь машины при ее погружении в воду. *Взрывобезопасная* машина должна противостоять взрыву газа внутри машины и не передавать его во внешнюю среду.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 1.1. Принцип действия машин
постоянного тока

Простейшим генератором постоянного тока может служить виток из проводника в виде рамки, вращающейся в магнитном поле между двумя постоянными магнитами N и S (рис. 1.1). Концы вит-

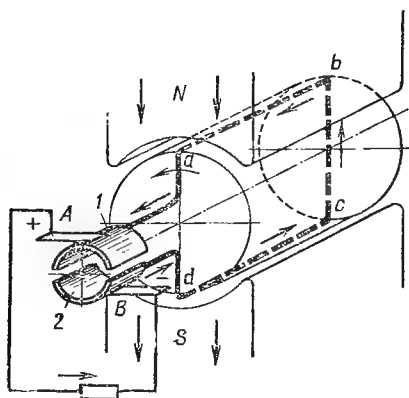


Рис. 1.1. Схема работы машины постоянного тока

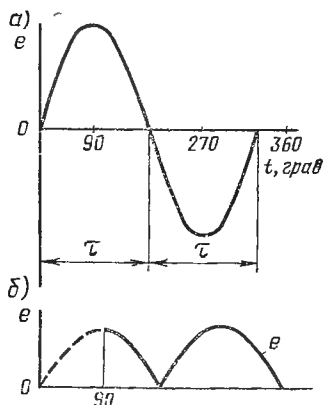


Рис. 1.2. Э. д. с., индуктируемая в витке (а) и на внешнем участке цепи (б)

ка $abcd$ присоединяются к двум медным пластинам коллектора, изолированным друг от друга и от вала, на котором они помещены. На пластинах помещены неподвижные щетки A и B , к которым присоединена внешняя цепь, состоящая из каких-либо приемников электроэнергии. При вращении витка с постоянной частотой проводники ab и cd пересекают магнитные линии, при этом в проводниках индуктируется э. д. с. При равномерном распределении магнитного поля в пространстве э. д. с. проводника

$$e = E \sin \omega t, \quad (1.1)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; f — частота э. д. с.

Таким образом, при условии равномерного распределения магнитного поля в витке индуктируется переменная синусоидальная э. д. с. (рис. 1.2, а). Направление индуктируемой в проводнике

э. д. с. определяется правилом правой руки, т. е. при перемещении проводника ab под северным полюсом в нем наводится э. д. с., направленная из-за плоскости чертежа, а когда он проходит под южным полюсом, — за плоскость чертежа. Таким образом, в проводнике ab наводится переменная во времени э. д. с., изменяющая свое направление 2 раза за один оборот витка. Время T , за которое изменяется э. д. с., называют *периодом*. Число периодов в одну секунду называют *частотой*. В общем случае, когда машина имеет p пар полюсов, частота наводимой э. д. с. увеличивается пропорционально p , т. е. $f = pn$, где n — частота вращения витка в секунду.

Для нормальной работы генератора нужно установить щетки так, чтобы наводимая в витке э. д. с. была равна нулю в момент перехода щетки с одной пластины на другую. Каждая из щеток будет соприкасаться только с той коллекторной пластиной и соответственно только с тем из проводников, которые находят под полюсом данной полярности. Например, в момент времени, показанный на рис. 1.1, щетка A соприкасается с пластиной 1 и имеет положительный потенциал, так как к ней подводится э. д. с. от проводника ab , находящегося под северным полюсом. При повороте якоря на 90° виток будет расположен так, что его проводники перемещаются вдоль магнитных линий поля, не пересекая их. Поэтому э. д. с., наведенная в витке, равна нулю. Щетки соединяют коллекторные пластины между собой и тем самым замыкают виток накоротко. При повороте витка на 180° щетка A соприкасается с пластиной 2 , но по-прежнему она имеет положительный потенциал, так как к ней подводится э. д. с. от проводника cd , заменившего проводник ab под северным полюсом. Аналогично можно видеть, что щетка B имеет всегда только отрицательный потенциал. Таким образом, по витку $abcd$ по-прежнему протекает переменный ток; при этом по внешнему участку цепи ток проходит только в одном направлении, а именно от положительной щетки A к отрицательной щетке B , т. е. происходит выпрямление переменной э. д. с., наведенной в витке, в пульсирующую на внешнем участке цепи (рис. 1.2, б). Как видно из рисунка, кривая э. д. с. помимо постоянной содержит большую переменную составляющую, называемую пульсацией э. д. с. Для ее уменьшения следует увеличить число коллекторных пластин. Если, например, в магнитном поле полюсов поместить два витка, оси которых сдвинуты на 90° в пространстве, и концы этих витков соединить с четырьмя коллекторными пластинами, то при вращении витков индуцируемые в них э. д. с. окажутся сдвинутыми по фазе на угол $\pi/2$. Щетки в такой машине надо поместить так, чтобы они соприкасались с пластинами того витка, в котором в данный момент э. д. с. имеет наибольшее значение и на щетках будет э. д. с., пульсация которой много меньше, чем при двух коллекторных пластинах. При дальнейшем увеличении числа коллекторных пластин пульсация уменьшается и при 16 пластинах на пару полюсов становится менее 1%.

В действительности распределение магнитного поля в пространстве неравномерно (рис. 1.3). Для увеличения э. д. с. (напряжения)

на щетках электрические машины выполняют с многовитковыми обмотками якоря. На рис. 1.4, *a* показаны схема двухполюсного генератора постоянного тока, обмотка якоря которого состоит из четырех витков, и схема токопрохождения в проводах обмотки. Коллектор генератора имеет четыре пластины и на нем располагают две неподвижные щетки, с помощью которых обмотка якоря соединяется с внешней цепью. К этим щеткам параллельно приложены две суммарные э. д. с.: одна от проводов 7, 8, 1, 2 и другая от проводов 6, 5, 4, 3. Причем э. д. с. проводов 7, 8 и проводов 1, 2 сдвинуты относительно друг другу на угол 90° . Также сдвинуты на 90° э. д. с. проводов 6, 5 и э. д. с. проводов 4, 3. На рис. 1.4, *б* и *в* представлены графики изменения э. д. с. в параллельных цепях обмотки якоря в зависимости от времени.

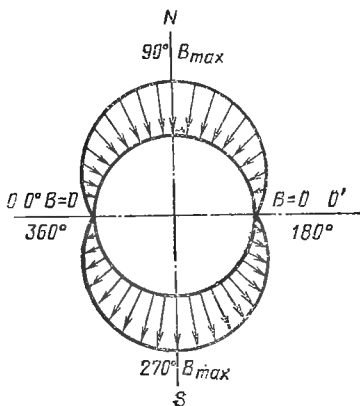


Рис. 1.3. Диаграмма распределения магнитной индукции под полюсом

Если увеличить число коллекторных пластин и число проводов (витков) обмотки якоря, то результирующая кривая э. д. с. становится близкой к прямой линии с незначительной по величине пульсацией. Таким

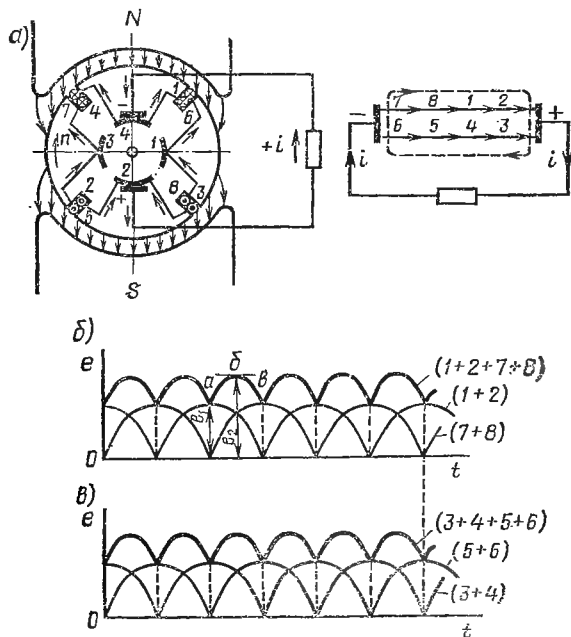


Рис. 1.4. Генератор постоянного тока с обмоткой якоря из четырех витков

образом, коллектор в генераторе постоянного тока выполняет роль преобразователя переменной э. д. с., индуцируемой в обмотке якоря, в постоянную на щетках, т. е. осуществляет выпрямление э. д. с.

Электрические машины чаще изготавливают многополюсными. На рис. 1.5 изображена схема четырехполюсного генератора постоянного тока. Линию, перпендикулярную оси полюсов и проходящую между разноименными полюсами, называют *геометрической нейтралью*, а часть окружности якоря, соответствующую одному полюсу, — *полюсным делением*. Рассматриваемая простейшая машина может работать двигателем, если к обмотке ее якоря подвести постоянный ток от внешнего источника.

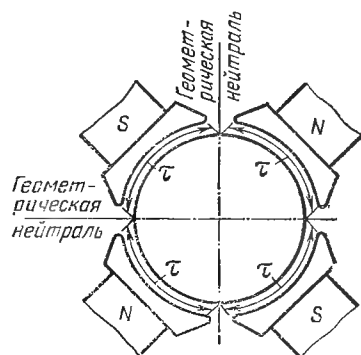


Рис. 1.5. Схема четырехполюсного генератора

§ 1.2. Устройство и основные элементы конструкции машины постоянного тока

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части — статора и вращающейся части — якоря, в котором происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую (генератор) или обратно — электрической энергии в механическую (электродвигатель). Между неподвижной и вращающейся частями имеется зазор. Неподвижная часть (рис. 1.6) состоит из станины 3, главных полюсов 1, предназначенных для создания основного магнитного потока, добавочных полюсов 2, служащих для достижения безыскровой работы щеток на коллекторе (улучшения коммутации). К станине крепят болтами подшипниковые щиты, главные и дополнительные полюсы. Основной (главный) полюс (рис. 1.7, а) имеет сердечник 4, набранный из листов электротехнической стали толщиной 0,5—1 мм, стянутых шпильками. На сердечник насажены две катушки обмоток возбуждения 2. Нижнюю часть сердечника — полюсный наконечник 3 — выполняют так, чтобы воздушный зазор увеличивался от центра полюса к его концам. Это делается для того, чтобы уменьшить искажение поля под действием реакции якоря и рассеяние главного поля в зоне коммутации. У компенсированных машин постоянного тока в полюсных наконечниках выштамповывают пазы для размещения компенсационной обмотки. Число главных полюсов всегда

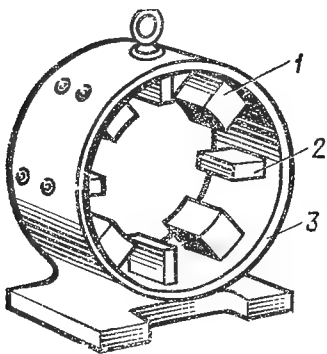


Рис. 1.6. Неподвижная часть машины постоянного тока

буждения 2. Нижнюю часть сердечника — полюсный наконечник 3 — выполняют так, чтобы воздушный зазор увеличивался от центра полюса к его концам. Это делается для того, чтобы уменьшить искажение поля под действием реакции якоря и рассеяние главного поля в зоне коммутации. У компенсированных машин постоянного тока в полюсных наконечниках выштамповывают пазы для размещения компенсационной обмотки. Число главных полюсов всегда

четное, причем и северные и южные полюсы чередуются, что достигается соответствующим соединением катушек обмотки возбуждения полюсов. Катушки всех полюсов соединяют последовательно. Полюсы крепятся к станине 1 болтами или шпильками.

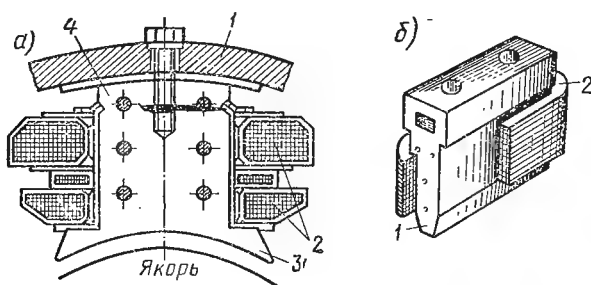


Рис. 1.7. Основной (а) и добавочный (б) полюсы

Добавочный полюс (рис. 1.7, б) состоит из сердечника 1, изготовляемого из стали, и обмотки 2, изготовляемой из медных шин прямоугольного сечения. Обмотки добавочных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря, а полюсы устанавливают между главными полюсами и крепят к станине болтами. Воздушный зазор под добавочными полюсами значительно больше, чем под главными. Поперечное сечение добавочных полюсов расширяется в сторону корпуса. Это увеличивает поверхность прилегания добавочного полюса к корпусу, что дает большую устойчивость и предупреждает насыщение от большого потока рассеяния добавочных полюсов.

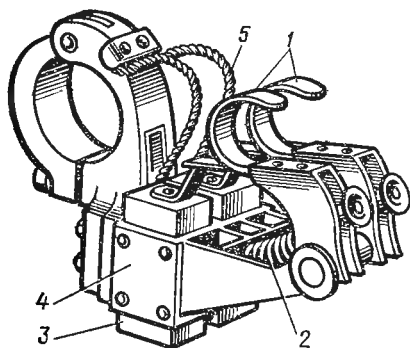


Рис. 1.8. Щеткодержатель

Для создания электрического контакта с поверхностью коллектора в машине устанавливают щетки, которые прикрепляют к щеткодержателю. Щеткодержатель (рис. 1.8) состоит из нажимных пластин 1; пружины 2, передающей давление на щетку 3; из обоймы 4. Для присоединения элементов электрической цепи машины к щетке последняя снабжается гибким медным тросиком 5. Все щеткодержатели одной полярности соединяют между собой сборными шинами, присоединенными к выводам машины. Щеткодержатели крепят на траверсе.

Якорь машины постоянного тока состоит из сердечника якоря с обмоткой, коллектора, вентилятора и вала с шарикоподшипником или роликоподшипником.

Сердечник якоря (рис. 1.9, а) машины представляет собой пакет из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, которые для уменьшения потерь от вихревых токов изолируют друг от друга

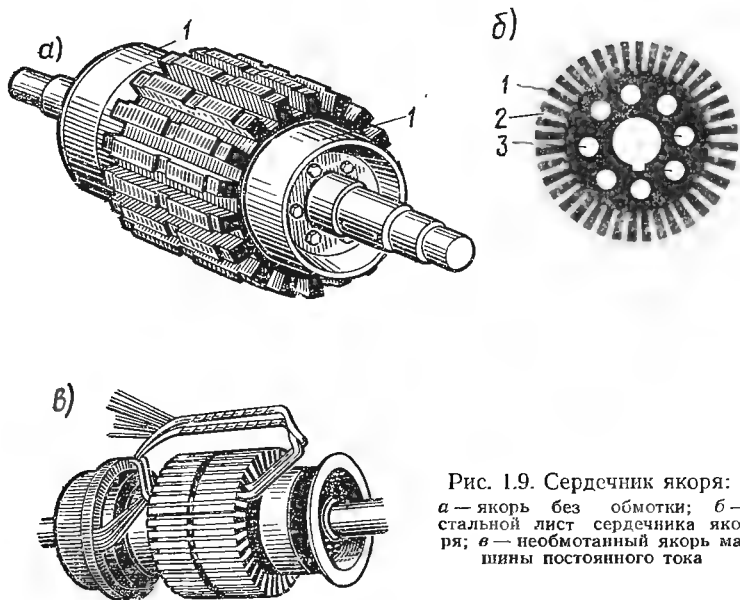


Рис. 1.9. Сердечник якоря:
а — якорь без обмотки; б —
стальной лист сердечника якоря;
в — необмотанный якорь ма-
шины постоянного тока

лаком. Пакет запрессован на валу якоря и удерживается в сжатом состоянии нажимными шайбами 1. Для лучшего охлаждения машины в сердечниках якоря устраивают вентиляционные каналы. Каждый лист пакета (рис. 1.9, б) имеет зубцы 1, пазы 2 и вентиляционные отверстия 3. В пазы сердечника укладывают проводники обмотки якоря (рис. 1.9, в). Обмотку якоря присоединяют к пластинкам коллектора. На рис. 1.10 показан коллектор, собранный из пластин 7 твердотянутой меди, изолированных друг от друга и от вала якоря миканитовыми прокладками 4 и манжетами. Коллектор состоит из корпуса 1, болтов 2, нажимного кольца 3, миканитовых прокладок 4. Для удобства монтажа и обеспечения прочности крепления коллекторные пластины 7 выполняют в форме «ласточкина хвоста» 6. Соединяют коллекторные пластины с про-

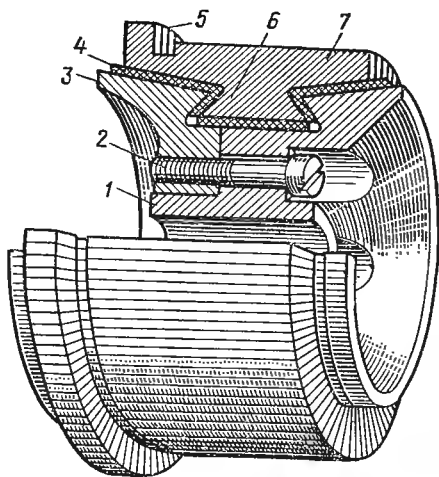


Рис. 1.10. Устройство коллектора

водами обмотки якоря с помощью «петушков» 5, которые имеют прорези для укладки и запайки в них концов секций обмотки якоря.

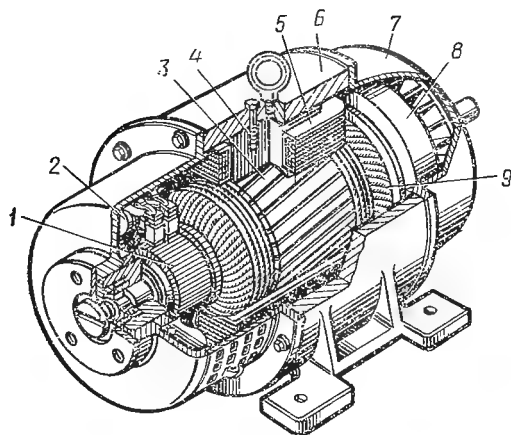


Рис. 1.11. Устройство машины постоянного тока

На рис. 1.11 показано устройство машины постоянного тока. К станине 6 болтами крепят главные полюсы, состоящие из сердечника 4 и катушки обмотки возбуждения 5. С торцовых сторон к станине крепят боковые щиты 7 с подшипниками, удерживающими вал машины. Якорь машины состоит из сердечника 3, обмотки 9 и коллектора 1. На валу якоря укреплен вентилятор 8, на коллекторе помещены неподвижные щетки 2.

§ 1.3. Системы вентиляции электрических машин

Электрические машины подразделяют в зависимости от способа охлаждения на:

Машины с естественным охлаждением. У них нет специальных устройств для усиления эффективности охлаждения.

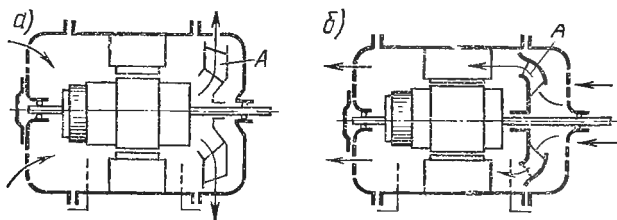


Рис. 1.12. Аксиальные системы самовентиляции машины постоянного тока

Естественную вентиляцию применяют в машинах малой мощности, так как условия их охлаждения сравнительно легкие.

Машины с самовентиляцией. У них охлаждение достигается с помощью вентилятора (крылатки). Самовентиляцией может быть внутренняя, когда воздух проходит внутри машины, и наружная, когда вентилятор выносят наружу и он обдувает внешнюю ребристую поверхность станины. Внутренняя самовентиляция в зависимости от расположения вентилятора по отношению к потоку охлаждающего воздуха может быть вытяжной или нагнетатель-

ной. При аксиальной вытяжной вентиляции (рис. 1.12, *а*) вентилятор *A* создает в машине разряжение: воздух под давлением атмосферы поступает в машину и затем выбрасывается из нее наружу. При аксиальной нагнетательной вентиляции (рис. 1.12, *б*) вентилятор *A* забирает воздух, нагнетает в машину и затем выталкивает

Рис. 1.13. Машины с радиальной системой охлаждения (*а*) и схема вентиляции с внешним обдувом корпуса (*б*)

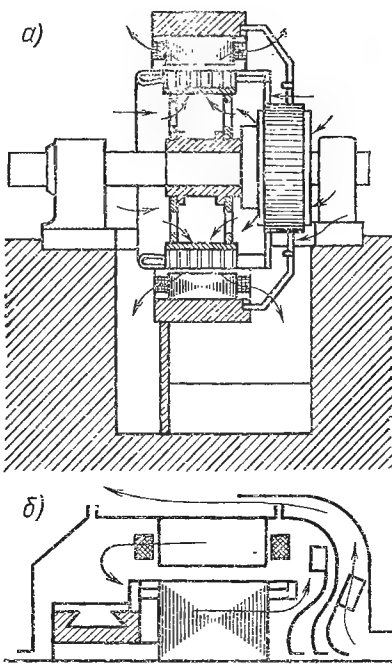
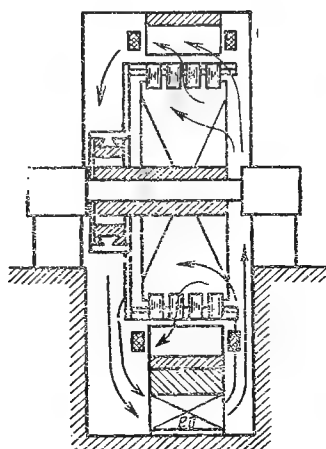


Рис. 1.14. Схема замкнутой системы вентиляции



его наружу. При аксиальной вентиляции охлаждающий воздух проходит по внутренним вентиляционным каналам параллельно оси вала, а при радиальной вентиляции — перпендикулярно (рис. 1.13, *а*). Недостаток самовентиляции состоит в том, что при снижении частоты вращения машины резко падает производительность вентилятора, в результате чего ухудшается интенсивность охлаждения машины. На рис. 1.13, *б* изображена схема вентиляции с внешним обдувом корпуса машины.

Машины с независимым охлаждением. В них воздух поступает от вентилятора, работающего независимо от машины. Вентиляция может быть протяжной или замкнутой. При протяжной системе вентиляции холодные массы воздуха подводятся извне, проходят через машину и выбрасываются в окружающую атмосферу. Недостаток такой системы заключается в том, что на внутренних поверхностях машины накапливаются пыль и грязь, которые всегда содержатся в воздухе, вызывая ухудшение условий охлаждения машины. Это может быть причиной аварии. Примене-

ние фильтров на входе воздуха в машину нерационально, так как их нужно часто очищать и они увеличивают сопротивление движению воздуха.

При замкнутой системе вентиляции (рис. 1.14) охлаждающий воздух проходит по замкнутому контуру через воздухоохладители ВО. При такой вентиляции машина предохраняется от попадания в нее пыли. В качестве охлаждающей среды допускается применение не только воздуха, но и водорода. При водородном охлаждении вентиляционные потери снижаются почти в десять раз, а срок службы изоляции увеличивается, так как исключаются окислительные процессы. Для устранения взрыва, в случае образования внутри машины гремучего газа, через нее предварительно пропускают углекислый газ. Затем машину заполняют водородом под давлением выше атмосферного, что предупреждает попадание воздуха внутрь машины.

Глава 2

ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 2.1. Устройство обмоток

Обмотка якоря — важнейший элемент машины, удовлетворяющий следующим требованиям:

1) обмотка должна быть рассчитана на заданные величины напряжения и тока нагрузки, соответствующие номинальной мощности, и иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочности, обеспечивающие достаточно продолжительный срок службы машины (до 20 лет);

2) конструкция обмотки должна обеспечить удовлетворительные условия токоотвода с коллектора без вредного искрения;

3) расход материала при заданных эксплуатационных показателях (к. п. д. и др.) должен быть минимальным;

4) технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

В современных машинах постоянного тока обмотку якоря укладывают в пазы на внешней поверхности якоря (рис. 2.1), что упрощает технологию ее изготовления, повышает использование провода и делает обмотку более надежной. Обмотка состоит из ряда последовательно соединенных секций, каждая из которых имеет две активные стороны, размещаемые в пазах якоря. На торцевых сторонах сердечника якоря активные стороны соединяют лобовыми проводами. Для того чтобы не было пересечения лобовых соединений, т. е. чтобы они не лежали в одной плоскости, обмотки выполняют двухслойными (рис. 2.2). Активные стороны располагают в пазах 1, находящимися между зубцами 2, а с торцевых сторон скрепляют лобовыми соединениями 3. При этом одна активная сторона каждой секции лежит в верхнем слое паза, а другая — в нижнем (рис. 2.3). Каждую активную сторону секции 2 изолируют и укладывают в паз 3, предварительно изолированный. После укладки

всех активных сторон паз заклинивают немагнитным клином 1. Для придания якорю большей механической прочности лобовые соединения обмотки стягивают стальными бандажами.

Секции обмоток машин постоянного тока могут быть одновитковыми (рис. 2.4, а), состоящими из двух активных проводов, и многовитковыми (рис. 2.4, б). Обмотки якорей машин постоянного тока подразделяют на петлевые (параллельные), волновые (послед-

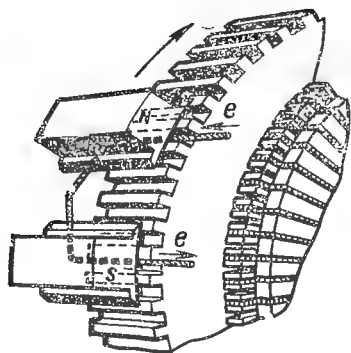


Рис. 2.1. Расположение активных сторон секции на сердечнике якоря

Рис. 2.2. Двухслойное расположение секций обмотки якоря

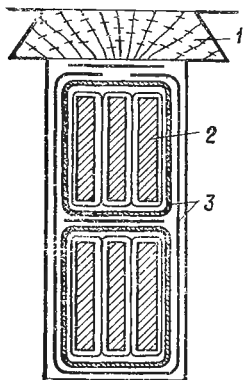
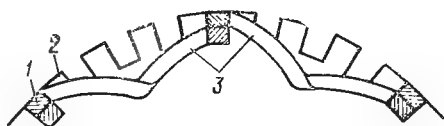


Рис. 2.3. Поперечный разрез паза с обмоткой

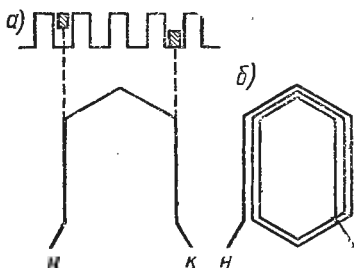


Рис. 2.4. Секции обмоток якоря

довательные) и комбинированные (параллельно-последовательные). Обмотки могут быть простыми и сложными (кратными), причем последние образуются из нескольких простых обмоток. На рис. 2.5, а показана секция (катушка) многовитковой волновой обмотки. Полукатушка из двух одинаковых полусекций волновой обмотки изображена на рис. 2.5, б, а петлевой — на рис. 2.5, в. На развернутых схемах обмоток стороны секций, находящиеся в верхнем слое, изображают сплошными линиями, а стороны, расположенные в нижнем слое, прерывистыми линиями (рис. 2.6). Секции обмотки соединяют друг с другом в последовательную цепь таким

образом, что начало последующей секции присоединяют вместе с концом предыдущей секции к общей коллекторной пластине. Поскольку каждая секция имеет два конца и к каждой коллекторной пластине присоединены также концы двух секций, то общее число пластин коллектора K равно числу секций обмотки S ; т. е. $K=S=N/(2\omega)$, где N — число активных проводов обмотки якоря; ω — число витков в секции. В простейшем случае в пазу находятся две секционные стороны; одна в верхнем и другая в нижнем слое.

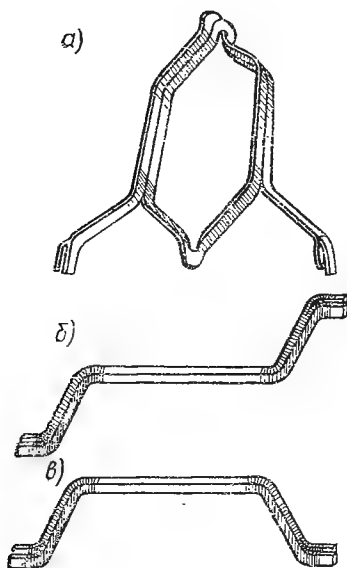


Рис. 2.5. Катушка (а) и полукатушка волновой обмотки (б), полукатушка секции петлевой обмотки (в)

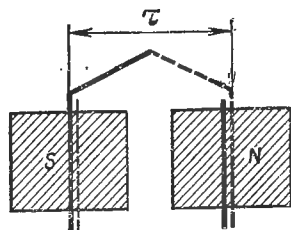


Рис. 2.6. Изображение секции на развернутой схеме

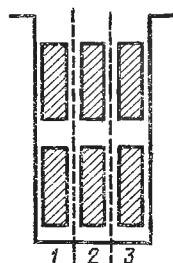


Рис. 2.7. Подразделение реального паза на элементарные

При этом число пазов якоря $Z=S$. Для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения, а также во избежание чрезмерно большого напряжения между соседними коллекторными пластинами число пазов должно быть достаточно большим. Однако изготовление якорей с большим числом пазов нецелесообразно, так как при этом пазы будут узкими, значительная часть их площади занята изоляцией секций от корпуса, и для проводников останется мало места, получается проигрыш в мощности машины. По этим причинам обычно в каждом слое паза располагают рядом несколько ($u_n=2, 3, 4, 5$) секционных сторон (рис. 2.7). При этом $K=S=u_n Z$. В данном случае говорят, что в каждом реальном пазу имеется u_n элементарных пазов, поэтому в каждом слое элементарного паза — одна секционная сторона. Очевидно, что общее число элементарных пазов якоря $Z_0=u_n Z=S=K$. В одном полюсном делении τ со-

держится $Z_s/(2p)$ элементарных пазов. Но часто Z_s не делится без остатка на $2p$, тогда вводят дробную величину ξ , с помощью которой величина шага округляется до целого числа:

$$y_1 \approx \tau = Z_s/(2p) \pm \xi. \quad (2.1)$$

§ 2.2. Петлевая обмотка

Простая петлевая обмотка. Простой петлевой (параллельной) обмоткой якоря называют обмотку, у которой концы каждой секции присоединены к двум рядом лежащим коллекторным пластинам

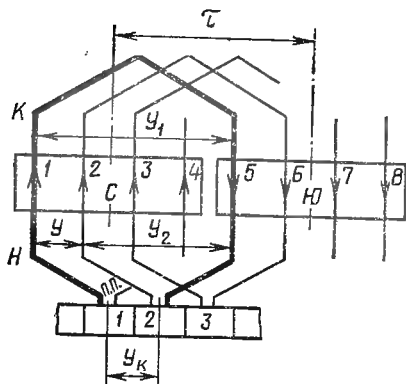


Рис. 2.8. Развернутая схема простой петлевой обмотки якоря:

H — начало провода; K — конец провода;
п. п. — последний провод

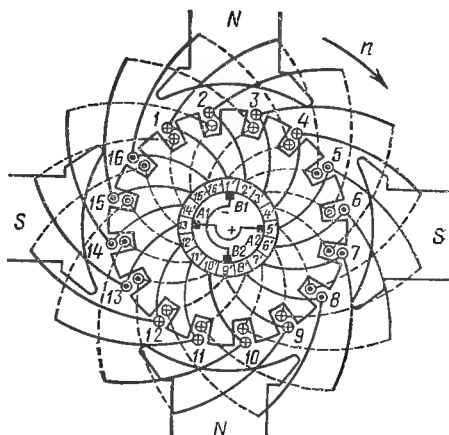


Рис. 2.9. Радиальная схема простой петлевой обмотки: $2p=4$; $S=K=16$

нам (рис. 2.8). Если при выполнении обмотки конец секции присоединяют к коллекторной пластине, находящейся справа от исходной, то такую обмотку называют *правоходовой* или *неперекрещивающейся*. При смещении в левую сторону обмотку называют *левоходовой* или *перекрещивающейся*. Левоходовые обмотки не находят практического применения, так как увеличивают расход обмоточного провода. На рис. 2.8 показаны шаги обмотки y_1 ; y_2 ; y , которые будем определять числом элементарных пазов. Первый частичный шаг $y_1 = Z_s/(2p) \pm \xi$ определяет расстояние по поверхности якоря между начальной «H» и конечной «K» сторонами секции: ξ — величина, меньшая единицы, вычитая или суммируя которую, можно получить шаг y_1 , выраженный целым числом. Второй частичный шаг обмотки y_2 определяет расстояние между конечной стороной данной секции и начальной стороной последующей. Результирующий шаг обмотки y определяет расстояние между начальными сторонами данной и последующей за ней секций. Шаг по коллектору y_k определяет расстояние в коллекторных делениях между середи-

нами коллекторные пластины, к которым присоединены концы данной секции. Шаг по коллектору всегда равен результирующему шагу обмотки: $y_K = y$. В простой петлевой обмотке шаг по коллектору $y_K = 1$.

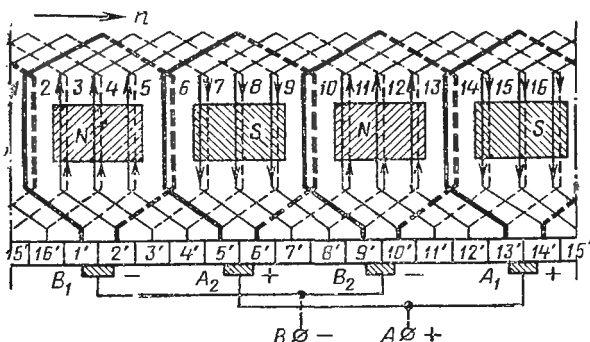


Рис. 2.10. Развернутая схема одноходовой петлевой обмотки: $2p=4$; $S=K=16$

Пример. На рис. 2.9 изображена радиальная схема простой петлевой обмотки со следующими данными: $2p=4$; $S=K=Z_a=16$. Тогда $y_1 = S/(2p) \pm \xi$; $y_1 = 16/4 - 0 = 4$; $y = y_K = 1$; $y_2 = y_1 - y$; $y_2 = 4 - 1$; $y_2 = 3$. Для облегчения вычерчивания схемы удобно обозначить одинаковыми цифрами секционные стороны, пазы и коллекторные пластины, с которыми они соединены. Выполнение схемы начинают с соединения секционных сторон, образующих секции в соответствии с первым шагом. Таким образом, необходимо соединить верхнюю сторону 1 секции с нижней стороной, расположенной на расстоянии четырех промежутков от стороны 1, т. е. с нижней стороной 5. Начало первой секции (сторону 1) соединяют с коллекторной пластиной 1', а конец первой секции (нижнюю сторону 5) — с коллекторной пластиной 2', с которой соединяют также начало 2 второй секции. Вторая секция образована сторонами 2 и 6, и конец ее присоединяют к пластине 3' и т. д. При вращении

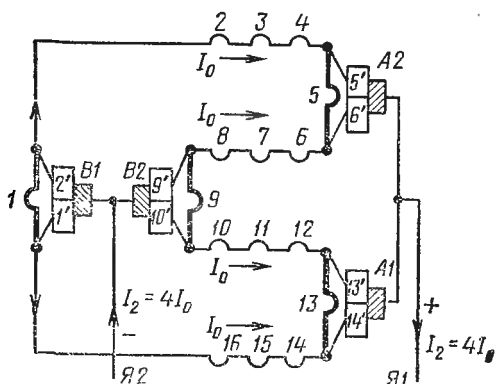


Рис. 2.11. Параллельные ветви одноходовой петлевой обмотки

якоря по часовой стрелке направление э. д. с. (согласно правилу правой руки) в проводниках показано на рис. 2.9 точками и крестиками. При обходе обмотки по схеме можно установить, что для рассматриваемого положения якоря коллекторные пластины 1', 5', 9' и 13' являются узловыми точками, к которым присоединены секции, имеющие встречное направление э. д. с. Эти коллекторные пластины делят всю обмотку на участки с одинаковым направлением э. д. с. в секциях. Если на эти пластины установить щетки, то щетки A1 и A2, с которых поступает ток во внешнюю сеть,

считаются положительными, а щетки $B1$ и $B2$ — отрицательными. Щетки одинаковой полярности соединяют между собой параллельно. Для характеристики обмотки необходимо знать, как расположены в магнитном поле ее секции и как они соединены между собой. На схеме обмотки цилиндрическая поверхность якоря, разрезанная вдоль оси машины в любом месте, из соображений удобства разворачивается на плоскость и представляется прямоугольником. На этом прямоугольнике пазы якоря условно изображаются отрезками прямых. Развернутая схема рассмотренной выше обмотки изображена на рис. 2.10. От каждой щетки отходят в противоположные стороны две параллельные ветви обмотки и заканчиваются на соседних щетках. Секции параллельной ветви размещаются под парой расположенных рядом полюсов, и так как обмотка двухслойная, то на

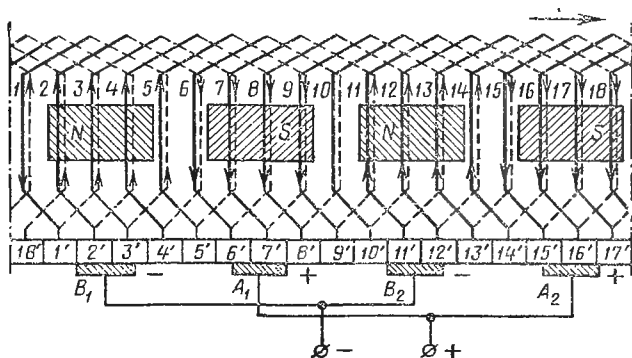


Рис. 2.12. Развернутая схема сложной петлевой обмотки:
 $2p=4$; $S=K=18$; $2a=2mp=8$

каждую пару полюсов приходится две параллельные ветви. Таким образом, общее количество параллельных ветвей обмотки $2a=2p$. Для большей наглядности параллельные ветви рассмотренной обмотки показаны на рис. 2.11. В данном примере четырехполюсной машины обмотка образует четыре параллельные ветви, в каждой из которых протекает ток одной параллельной ветви I_0 , а во внешней цепи — $I_2=4I_0$.

Сложная петлевая обмотка. Сложную, или кратную, петлевую обмотку можно рассматривать как сочетание нескольких ($m=2, 3, 4 \dots$) простых петлевых обмоток. Такую обмотку называют также *сложной параллельной*. В рассматриваемой обмотке секции и коллекторные пластины m простых обмоток по окружности чередуются, и для отвода тока из обмотки необходимо, чтобы ширина щеток была не меньше m коллекторных делений. Таким образом, m простых обмоток включаются с помощью щеток параллельно и количество параллельных ветвей сложной петлевой обмотки $2a=2pm$. Результирующий шаг по элементарным пазам и шаг по коллектору сложной петлевой обмотки $y=y_k=m$. Шаги y_1 и y_2 определяются так же, как и для простой петлевой обмотки. Возможность получения в сложных обмотках большого числа ветвей без увеличения числа полюсов составляет наиболее отличительную особенность этих обмоток. Их применяют в мощных машинах низкого напряжения с большими токами якоря, например в генераторах для электролиза.

На рис. 2.12 изображена развернутая схема сложной петлевой обмотки для $2p=4$; $S=K=18$; $m=2$. Здесь $y=y_k=m=2$; $y_1=18/4-2/4$; $y_1=4$; $y_2=y_1-y$; $y_2=-4-2$; $y_2=2$. При этом заметим, что если K/p равно четному числу, то такая сложная петлевая обмотка называется симметричной, если же K/p равно нечетному числу, — несимметричной. Построение развернутой схемы обмотки начнем с пластины и секции 1, обойдем все нечетные секции и пластины и вернемся к пластине 1', замкнув первый ход обмотки. Начав второй ход с пластины 2' и секции 2, обойдем все четные секции и пластины и снова вернемся к пластине 2, замкнув второй ход обмотки. Таким образом, мы имеем совокупность двух отдельных обмоток, совмещенных на якоре и работающих параллельно, — это сложная петлевая двукратнозамкнутая обмотка. В нашем случае имеем $2a=-2\cdot 4=8$ ветвей. Число щеток остается равным числу полюсов $2p$, но ширина каждой щетки должна быть такова, чтобы одновременно могли работать обе обмотки.

§ 2.3. Волновая обмотка

Простая волновая обмотка. Простая волновая (последовательная) обмотка получается при последовательном соединении секций, находящихся под разными парами полюсов. Концы секций

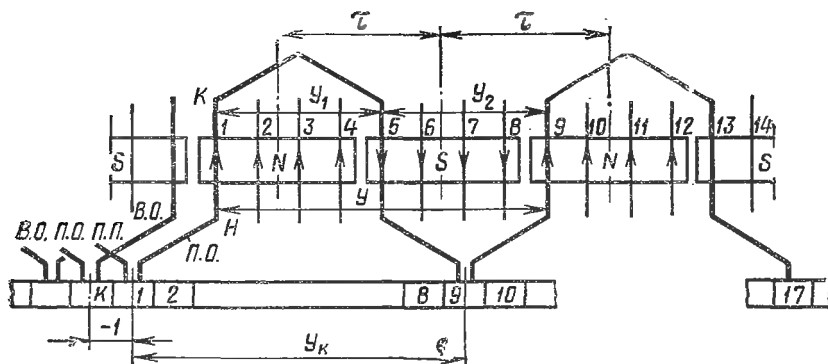


Рис. 2.13. Схема построения простой волновой обмотки якоря:

п. о. — первый обход обмотки по якору; в. о. — второй обход; п. п. — последний провод обмотки

волновой обмотки присоединены к коллекторным пластинам, удаленным друг от друга на расстоянии шага обмотки по коллектору $y_k=y=(K\pm 1)/p$ (рис. 2.13). За один обход по якору последовательно соединяют столько секций, сколько пар полюсов имеет машина. Таким образом, обойдя обмотку по окружности якоря попадаем в коллекторную пластину, расположенную рядом (слева) с той, от которой начат обход. Затем делается второй, третий и все последующие обходы, пока все провода не будут соединены между собой в одну замкнутую обмотку, конец которой присоединяют к первой коллекторной пластине. Такую обмотку называют *левоходовой*. Если же эта пластина расположена вправо от исходной, то обмотку называют *правоходовой*. Для правоходовой обмотки требуется больший расход обмоточного провода. Характерным свойством простой волновой обмотки является то, что число ее парал-

дельных ветвей не зависит от числа полюсов и всегда равно двум: $2a=2$. У волновой обмотки результирующий шаг y равен сумме частичных шагов y_1 и y_2 , т. е. $y=y_1+y_2$. Секции каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами машины. В такой обмотке можно было бы ограничиться применением только двух щеток. Однако в этом случае нарушилась бы симметрия обмотки, так как число секций в параллельных ветвях стало бы различным. Поэтому в машине обычно устанавливают столько щеток,

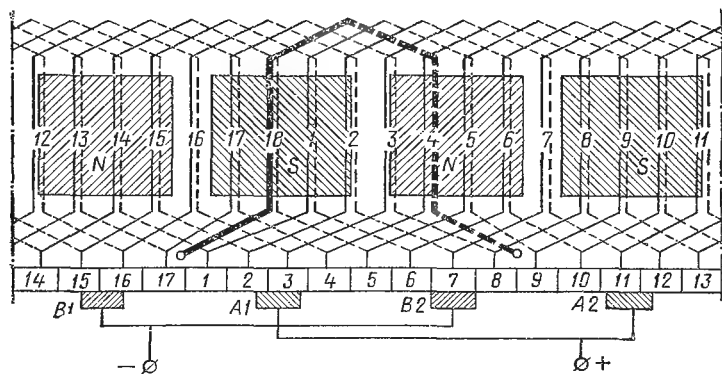


Рис. 2.14. Развернутая схема волновой обмотки с «мертвой» секцией

сколько основных полюсов, это позволяет уменьшить величину тока, приходящегося на каждую щетку. Однако в некоторых случаях устанавливают только две щетки с тем, чтобы сделать доступной для осмотра и смены щеток не всю окружность коллектора, а только ее часть. В простой волновой обмотке шаг по коллектору должен быть обязательно равен целому числу. Если это условие не выполняется, то уменьшают число элементарных пазов путем не присоединения одной секции к коллектору. Такую секцию называют «мертвой» секцией. Развернутая схема волновой обмотки с «мертвой» секцией изображена на рис. 2.14. Однако наличие несимметрии обмотки вызывает некоторые осложнения в условиях коммутации в зонах «мертвой» секции, поэтому в мощных машинах с напряженными условиями коммутации рекомендуется избегать применения волновых обмоток с «мертвой» секцией.

На рис. 2.15 изображена радиальная схема простой волновой обмотки по данным: $2p=4$; $S=K=15$. При выполнении обмотки мы соединяем между собой: коллекторную пластину $1'$, начало секции 1 в пазу 1 , конец ее в пазу $1+3=4$ и коллекторную пластину $1'+7'=8'$; отсюда идем к началу секции 8 в пазу 8 , к концу ее в пазу 11 , к коллекторной пластине $8'+7'=15'$ и т. д. Схема той же обмотки в развернутом виде изображена на рис. 2.16. Секции, замкнутые коротко щетками, показаны жирными линиями. Таким образом, имеем только две параллельные ветви, хотя число полюсов $2p=4$. Схема токопрохождения внутри обмотки или схема ветвей показана на рис. 2.17. Поскольку каждая из ветвей

волновой обмотки проходит под всеми полюсами, то равенство потоков полюсов не вызывает неравенства э. д. с. п токов параллельных ветвей. Поэтому простая волновая обмотка не нуждается в уравнивательных соединениях.

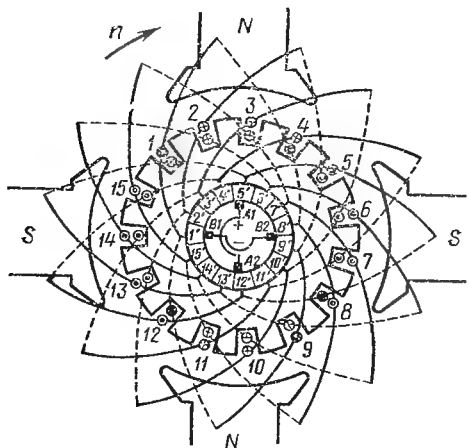


Рис. 2.15. Радиальная схема простой волновой обмотки: $2p=4$; $S=K=15$

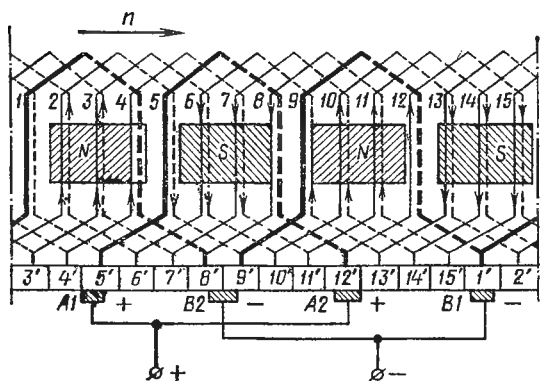


Рис. 2.16. Развернутая схема обмотки: $2p=4$; $S=K=15$

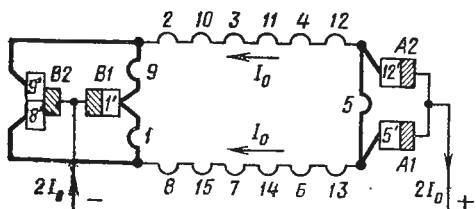


Рис. 2.17. Параллельные ветви волновой обмотки

Сложная волновая обмотка. Сложная волновая обмотка представляет собой несколько простых волновых обмоток, уложенных в пазы одного якоря. Так как каждая простая волновая обмотка имеет две параллельные ветви, то сложноволновая обмотка будет иметь число параллельных ветвей $2a=2m$, где m — число простых волновых обмоток, составляющих данную сложноволновую обмотку. Между собой эти обмотки соединяются параллельно проводниками — уравнивательными соединениями, и щетками на коллекторе. Желательно, чтобы число пластин, перекрываемое щеткой, было больше числа пар параллельных ветвей a . Шаг обмотки по коллектору $y_k=y=(K \pm m)/p$. При выполнении сложной волновой обмотки после одного обхода p последовательно соединенных секций якоря конец секции присоединяют к коллекторной пластине, отстоящей от исходной на m пластин, оставляя свободное место для укладки секций других простых обмоток. Сложные волновые обмотки могут быть од-

1) число проводников во всех пазах должно быть одинаковым, т. е. $S=N/Z$ равняется целому числу;

2) каждая пара параллельных ветвей должна содержать одинаковое число пазов, т. е. Z/a равняется целому числу;

3) каждая пара параллельных ветвей должна содержать одинаковое число секций, т. е. $S/a=K/a$ равняется целому числу;

4) каждой стороне секции, принадлежащей одной паре параллельных ветвей, должны соответствовать секционные стороны других пар параллельных ветвей, расположенных в одинаковых магнитных условиях. Для этого необходимо, чтобы $2p/a$ равнялось целому числу.

§ 2.5. Уравнильные соединения

Опыт эксплуатации машин с петлевыми обмотками показывает, что уравнильные токи в них возникают даже при выполнении условий симметрии. Причина тому — магнитная асимметрия машин (неодинаковые зазоры под различными полюсами, неточность сборки, наличие раковин в отливке станины и т. д.). При петлевой обмотке каждая пара параллельных ветвей расположена под своей парой полюсов. Вследствие магнитной асимметрии в них будут индуцироваться различные э. д. с. При волновой обмотке параллельные цепи охватывают все полюсы машины и такого явления не наблюдается. Уравнильные токи, складываясь с током нагрузки, вызывают неравномерную нагрузку параллельных ветвей, увеличивая электрические потери, и проходят из одной параллельной ветви обмотки в другую через щетки, в результате чего при нормальной нагрузке машины плотность тока под щетками оказывается выше нормы, что вызывает искрение на коллекторе. Для того чтобы уравнильные токи не замыкались через щетки, простые петлевые обмотки снабжают специальными уравнильными соединениями. При этом электрически соединяют точки на обмотке якоря, имеющие теоретически равные потенциалы, тогда уравнильные токи замыкаются внутри обмотки без выхода в щетки и соединяющие их шины. Эти уравнильные токи вызывают магнитный поток такого направления, который стремится уменьшить магнитную несимметрию машины. Уравнильные соединения, выравнивающие несимметрию магнитной системы машины, называют *уравнивателями первого рода*. Обычно такие уравниватели соединяют равнопотенциальные точки со стороны коллектора (рис. 2.19). Иногда соединяют на лобовых частях со стороны, противоположной коллектору. Число точек равного потенциала, которую мы можем найти в симметричной обмотке, $a=p$. Расстояние между двумя соседними равнопотенциальными точками называют *потенциальным* (уравнильным) *шагом*, измеряемым числом коллекторных делений или числом секций, соответствующих одной паре ветвей:

$$y_n = K/a = S/a = K/p.$$

Полное число уравнительных соединений первого рода $N_{ур}$, которое можно применить в обмотке, $N_{ур} = K/a$. Однако такое количество уравнительных соединений применяют только в машинах большой мощности, например в электродвигателях прокатных станов. В целях экономии меди и упрощения конструкции машины обычно применяют неполное число уравнивателей из медного провода с сечением, равным $1/4$, $1/2$ сечения проводника обмотки якоря. Если

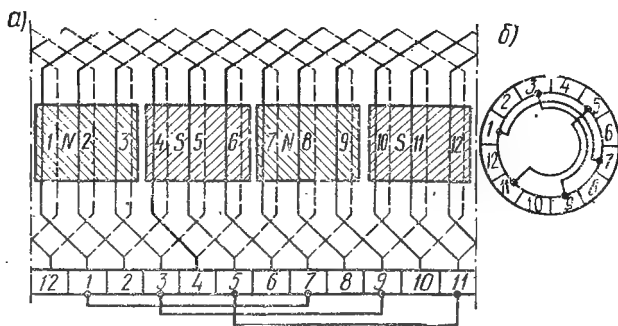


Рис. 2.19. Уравнительные соединения первого рода:
а — развернутая схема обмотки; б — вид со стороны коллектора

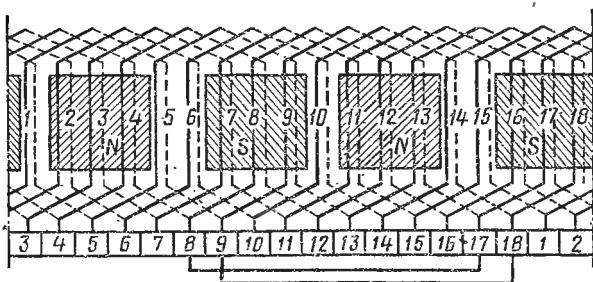


Рис. 2.20. Уравнители второго рода в сложной волновой обмотке

простые волновые обмотки не требуют никаких уравнительных соединений, то сложноволновые обмотки могут хорошо работать только при выполнении их с уравнительными соединениями. В сложноволновой обмотке соседние коллекторные пластины принадлежат разным простым волновым обмоткам, составляющим ее. Если переходные сопротивления между щетками и коллекторными пластинами, принадлежащими разным обмоткам, не равны, то и токи в отдельных волновых обмотках также не равны. Неравномерное распределение тока повлечет за собой и неравные падения напряжения в обмотках, вследствие чего напряжения между соседними коллекторными пластинами могут сильно увеличиться. Для

устранения этого недостатка соединяют уравнительными проводниками такие точки простых волновых обмоток, которые теоретически должны иметь одинаковые потенциалы. Уравнительные соединения, выравнивающие несимметрию распределения напряжения по коллектору, называют *уравнителями второго рода* (рис. 2.20). Таким образом, разница между уравнителями первого и второго рода состоит в том, что уравнители первого рода выравнивают несимметрию магнитной системы машины, а уравнители второго рода — несимметрию распределения напряжения по коллектору.

§ 2.6. Обмотка смешанного типа

В машинах постоянного тока большой мощности иногда применяют *смешанную* (лягушечью) *обмотку* якоря, представляющую собой сочетание простой петлевой и сложной волновой обмоток,

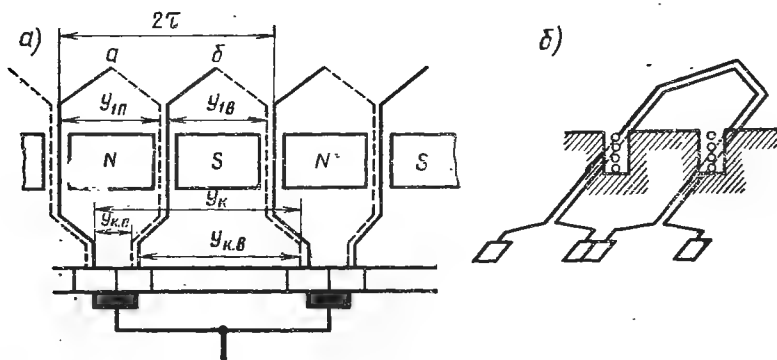


Рис. 2.21. Обмотка смешанного типа

расположенных в одних пазах якоря в четыре слоя и присоединенных к общему коллектору. При этом к каждой пластине припаивают по четыре проводника. На рис. 2.21, а изображена развернутая схема обмотки смешанного типа, на рис. 2.21, б — расположение одной секции этой обмотки в пазах. Основное достоинство этой обмотки состоит в том, что она не требует уравнительных соединений. В ней волновая обмотка выполняет функции уравнительных соединений первого рода для петлевой обмотки, а петлевая обмотка выполняет функции уравнительных соединений второго рода для волновой обмотки. Шаги обмоток по якорю, составляющих смешанную обмотку, делают одинаковыми: $y_{1\text{петл}} = y_{1\text{волн}}$. Шаг обмотки равен сумме шагов обмоток: $y_{1\text{петл}} + y_{1\text{волн}} = Z_p / (2p) + Z_p / (2p)$. Так как $Z_p = K$, то $y_{1\text{петл}} + y_{1\text{волн}} = K/p$. Потенциальный шаг по коллектору $y_n = K/p$.

Пример. Определить шаг и число уравнительных соединений простой петлевой обмотки, у которой $2p=6$; $K=162$.

Решение. Шаг уравнительных соединений $y_n = S/a = K/a = 162/3 = 54$. Число точек, соединяемых одним уравнителем, $n_n = a = 3$. Принимая, что каждая третья

пластина коллектора соединяется уравнивателем, находим число коллекторных пластин, соединяемых уравнительными соединениями $K_y = K/3 = 162/3 = 54$. Число уравнительных соединений $n_y = K_y/n_n = 54/3 = 18$. Между собой соединяются следующие коллекторные пластины: 1-м уравнивателем 1—55—109—1; 2-м уравнивателем 4—58—112—4; 3-м уравнивателем 7—61—115—7 и т. д.

§ 2.7. Электродвижущая сила обмотки якоря

В симметричной обмотке э. д. с. параллельных ветвей одинаковы и являются общей э. д. с. обмотки якоря. Величину э. д. с. параллельной ветви определяют на основании закона электромагнит-

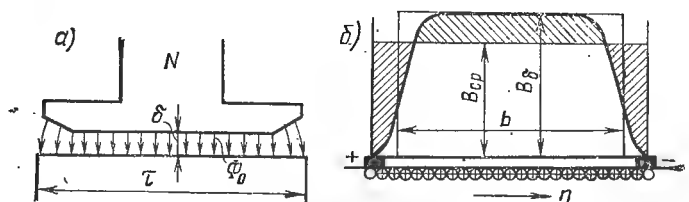


Рис. 2.22. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины при гладкой поверхности якоря

ной индукции. Воздушный зазор δ между главными полюсами и поверхностью якоря за счет формы наконечников полюсов делается значительно больше по их краям (рис. 2.22, а), в результате чего кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре имеет трапецеидальный характер с высотой, равной B_{δ} (рис. 2.22, б). Заменяв трапецию прямоугольником с равновеликой площадью шириной b и высотой B_{cp} , можно считать, что магнитная индукция в магнитном зазоре является постоянной величиной. В таком случае, каждый проводник обмотки якоря будет пересекать при вращении одинаковое число силовых магнитных линий в единицу времени. Предположим, что обмотка якоря состоит из N активных проводников и образует $2a$ параллельных ветвей. Тогда число последовательно соединенных проводников в каждой ветви равно $N/(2a)$. Сумма э. д. с., наведенных в этих проводниках, будет составлять э. д. с. обмотки якоря машины. Среднее значение э. д. с., наведенной в одном проводнике, определяемое по закону электромагнитной индукции,

$$e_{cp} = B_{cp} v. \quad (2.1)$$

Суммарная э. д. с., наведенная во всех проводниках параллельной ветви обмотки,

$$E_y = e_{cp} N / (2a) = B_{cp} v N / (2a). \quad (2.2)$$

Линейная скорость вращения якоря

$$v = \pi D n / 60, \quad (2.3)$$

где n — частота вращения якоря; D — диаметр якоря.

Длину окружности по поверхности якоря, равную πD , можно определить также произведением полюсного деления τ на количество полюсов машины $2p$: $\pi D = \tau 2p$, тогда

$$v = \frac{\tau 2pn}{60}, \quad E_{\text{я}} = B_{\text{ср}} l \tau \frac{2pn}{60} \cdot \frac{N}{2a}.$$

Произведение $l\tau$ есть площадь, которую пронизывают магнитные силовые линии (рис. 2.23). Произведение площади и магнитной индукции дает магнитный поток Φ в воздушном зазоре машины, который сцеплен с витками обмотки якоря: $\Phi = B_{\text{ср}} l \tau$. Подставив

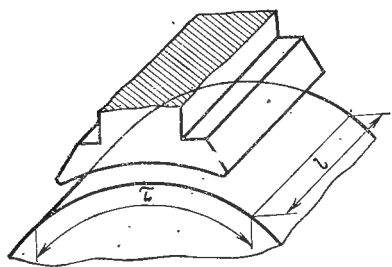


Рис. 2.23. К выводу формулы э. д. с. обмотки якоря

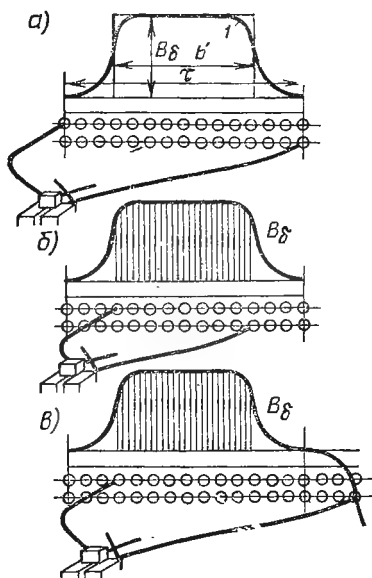


Рис. 2.24. Э. д. с. обмотки якоря

последнее выражение в формулу э. д. с. и произведя в ней сокращения, получим

$$E_{\text{я}} = \frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a} n \Phi. \quad (2.4)$$

Для каждой изготовленной машины p , N , a неизменны, поэтому (2.4) можно записать в следующем упрощенном виде:

$$E_{\text{я}} = k_E n \Phi, \quad (2.5)$$

где $k_E = pN/(60a)$ — постоянный коэффициент.

Э. д. с. параллельных ветвей зависит от их положения относительно главных полюсов, которое определяется установкой щеток на коллекторе. Если щетки установлены на коллекторных пластинах, соединенных с узловыми точками (при переходе через которые изменяется направление э. д. с. в секции), то э. д. с. параллельной ветви получается наибольшей (рис. 2.24, а). Здесь $y_1 = \tau$. При сдвиге щеток с этого положения в параллельную ветвь войдут секции с э. д. с. противоположного направления и общая э. д. с. параллельной ветви будет меньше (рис. 2.24, б). Если выполнить обмотку с шагом, меньшим полюсного деления ($y_1 < \tau$), то секция будет сцеплена с меньшим магнитным потоком (рис. 2.24, в) и э. д. с. машины уменьшится.

Пример. Определить э. д. с. машины постоянного тока, если число проводников обмотки якоря $N=360$, число пар полюсов $p=2$, число пар параллельных ветвей обмотки якоря $a=2$, частота вращения якоря $n=2000$ об/мин. Магнитный поток полюсов $\Phi=0,01$ Вб.

Решение. Значение э. д. с. по (2.4)

$$E_{\text{я}} = \frac{PN}{60a} n\Phi = \frac{2 \cdot 360}{60 \cdot 2} 2000 \cdot 0,01 = 120 \text{ В.}$$

§ 2.8. Сравнительные характеристики обмоток различных типов

Для одной и той же мощности машин постоянного тока снижения напряжения можно достичь за счет увеличения тока, и наоборот. Это соотношение — определяющее при выборе типа обмоток якоря. Ориентировочно считаем, что машины малой мощности — до 50 кВт, средней мощности — 50—500 кВт, большой мощности — больше 500 кВт. Машины постоянного тока низкого напряжения — до 24 В включительно, пониженного напряжения — 60—80 В; нормального — 110—220 В, повышенного — 440—600 В и высоковольтного — больше 750 В. Для повышенных значений тока применяют петлевую (параллельную) обмотку. Для повышенных значений напряжений применяют волновую (последовательную) обмотку. Если эти типы обмоток не удовлетворяют получению требуемой мощности, то применяют сложную петлевую, сложную волновую или обмотку смешанного типа. Для машин нормального и повышенного напряжения применяют волновую обмотку, так как в этой обмотке наибольшее число проводников параллельной ветви соединено последовательно. Простую петлевую обмотку широко применяют в машинах малой и средней мощности на нормальное напряжение; сложную волновую обмотку — в машинах средней и большой мощности повышенного напряжения; сложную петлевую обмотку — главным образом в машинах низкого напряжения на большую величину тока; смешанную обмотку — в машинах большой мощности. При технико-экономическом сравнении вариантов обмоток учитывают влияние типа обмотки якоря на массогабаритные параметры машины. При этом весьма существенным является учет частоты вращения якоря. Следует отметить также, что на выбор типа обмотки большое влияние оказывает среднее значение напряжения между коллекторными пластинами; от величины которого зависит безыскровая работа коллекторного устройства.

Глава 3

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 3.1. Порядок расчета магнитной цепи электрической машины

Намагничивающая сила н. с. обмотки возбуждения машины постоянного тока создает магнитное поле, магнитные линии которого замыкаются через участки машины, образующие ее магнитную

систему. На поперечном разрезе машины (рис. 3.1) показан путь магнитного потока. Весь магнитный поток Φ_n полюса делится на две неравные части. Большая часть — основной магнитный поток Φ_δ проникает через воздушный зазор в якорь и разветвляется в его сердечнике; подходит к соседним полюсам и замыкается через ярмо. Под *основным магнитным потоком* машины постоянного тока понимают поток в зазоре Φ_δ на площади, соответствующей одному полюсному делению τ , при холостом ходе машины. Меньшая часть

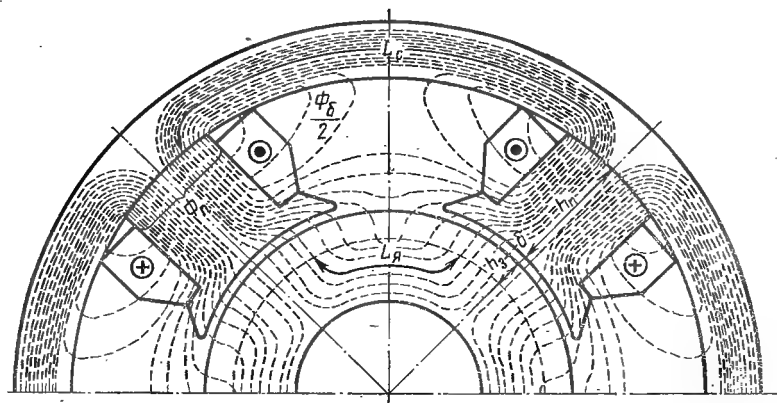


Рис. 3.1. Магнитная цепь машины постоянного тока

потока рассеяния Φ_σ замыкается между полюсами, минуя якорь. Тогда магнитный поток полюса

$$\Phi_n = \Phi_\delta + \Phi_\sigma = (1 + \Phi_\sigma / \Phi_\delta) \Phi_\delta = k_\sigma \Phi_\delta, \quad (3.1)$$

где $k_\sigma = 1 + \Phi_\sigma / \Phi_\delta$ — коэффициент рассеяния основных полюсов. Для машин постоянного тока $k_\sigma = 1,12 \div 1,25$. Путь основного магнитного потока в машине состоит из замкнутых магнитных цепей, каждая из которых охватывает пару полюсов. Вследствие магнитной симметрии отдельные магнитные цепи многополюсной машины одинаковы и магнитные потоки (а также их составляющие Φ_δ и Φ_σ) равны между собой; поэтому рассматривается магнитная цепь одной пары полюсов. Участки магнитной цепи отличаются друг от друга как своими геометрическими размерами, так и физическими свойствами. По закону полного тока для замкнутого контура н. с. одной пары полюсов

$$F = I_b w_b = \sum Hl = \sum I, \quad (3.2)$$

где I_b — ток возбуждения; w_b — число витков обмотки возбуждения; H — напряженность магнитного поля, зависящая от магнитной индукции и определяемая по кривым намагничивания (рис. 3.2); l — средняя длина данного участка магнитной цепи. В магнитной цепи электрической машины напряженность магнитного поля изменяется на границе участков из различных материа-

лов. По этому признаку магнитную цепь машины постоянного тока можно разделить на пять участков, характерные величины магнитной цепи которых приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Наименование участка	Поток участка	Индукция на участке	Площадь поперечного сечения участка	Напряженность магнитного поля	Длина пути на пару полюсов	Н. с. на пару полюсов
Зазор	Φ_0	B_δ	S_δ	H_δ	2δ	F_δ
Зубцовый слой (зубцы)	Φ_0	B_z	S_z	H_z	$2h_z$	F_z
Сердечник якоря	$\Phi_{я}=0,5\Phi_0$	$B_{я}$	$S_{я}$	$H_{я}$	$L_{я}$	$F_{я}$
Сердечник полюса с наконечником	$\Phi_{п}=k_\sigma\Phi_0$	$B_{п}$	$S_{п}$	$H_{п}$	$2h_{п}$	$F_{п}$
Ярмо (станина)	$\Phi_c=0,5\Phi_{п}$	B_c	S_c	H_c	L_c	F_c

Здесь F_δ — для двойного зазора; F_z — для двойной зубцовой зоны якоря; $F_{я}$ — для сердечника якоря; $F_{п}$ — для двух полюсов; F_c — для ярма (станины).

Рассчитанная на пару полюсов основная н. с. машины

$$F_0 = F_\delta + F_z + F_{я} + F_{п} + F_c. \quad (3.3)$$

Это уравнение показывает, что для определения н. с. нужно для каждого из пяти участков найти соответствующую ему напряженность магнитного поля H и умножить ее на длину пути потока на этом участке. Размеры участков магнитной цепи или известны (в выполненной машине), или устанавливаются по рекомендуемым магнитным индукциям (при проектировании машины), поэтому для

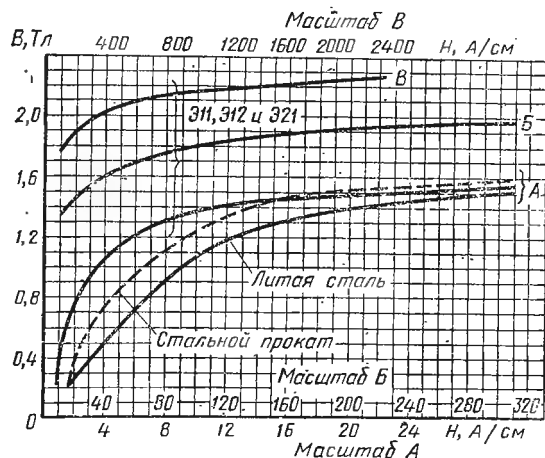


Рис. 3.2. Характеристики намагничивания электротехнической и литой сталей и стального проката

необходимого магнитного потока на всех участках магнитной цепи может быть определена индукция $B = \Phi/S$, где Φ — магнитный поток на участке; S — площадь сечения участка. В соответствии с рис. 3.1 основная н. с. машины

$$F_0 = H_\delta 2\delta + H_z 2h_z + H_\pi L_\pi + H_\pi 2h_\pi + H_c L_c, \quad (3.4)$$

где δ — длина воздушного зазора, м; h_z — высота зубцов якоря, м; h_π — высота главных полюсов, м; L_π — длина участка по сердечнику якоря, м; L_c — длина участка по станине (ядро), м; H — соответственно напряженность магнитного поля участка цепи, А/м.

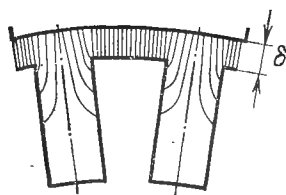


Рис. 3.3. Магнитная индукция в зазоре зубчатого якоря

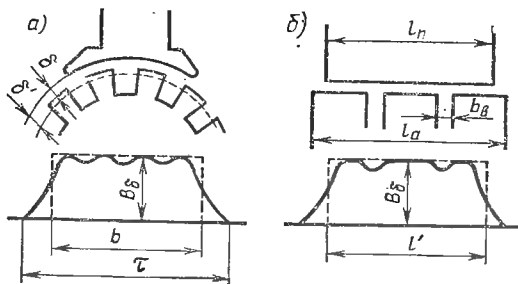


Рис. 3.4. Распределение магнитной индукции под полюсом:

а — на полюсном делении; б — по длине якоря

Будем считать, что номинальному значению напряжения и номинальной частоте вращения машины соответствует номинальное значение основного потока $\Phi_0 = 1$. Задавшись рядом значений основного потока: $0,5\Phi_0$; $0,8\Phi_0$; $1\Phi_0$; $1,2\Phi_0$, можем для каждого из них рассчитать F_0 .

Н. с. воздушного зазора. Наибольшее сопротивление магнитному потоку оказывает воздушный зазор. В зубчатом якоре магнитное поле в зазоре распределяется неравномерно: у поверхности зубцов плотность магнитных линий больше, а в пазах меньше (рис. 3.3), так как магнитное сопротивление на участке с зубцом меньше, чем с пазом. На рис. 3.4 показано распределение магнитной индукции в воздушном зазоре в поперечном и продольном разрезах машины. Так как магнитная индукция в зазоре изменяется как по окружности якоря, так и по его длине, то вводят понятие о расчетной индукции в зазоре, используя для этого метод приведения. Сущность этого метода заключается в следующем. Заменяют сложную кривую распределения магнитной индукции в зазоре равновеликим прямоугольником с высотой B_δ . Основание такого прямоугольника в первом случае дает расчетную полюсную дугу b' , а во втором случае — расчетную длину якоря l' . Отношение $b/\tau = \alpha'$ называют *расчетным коэффициентом полюсного перекрытия*, от величины которого зависит максимальное значение напряжения между коллекторными пластинами. В машинах постоянного

тока с добавочными полюсами $\alpha' = 0,62 \div 0,72$. С достаточной точностью определяют расчетную длину якоря $l'' = (l_{\pi} + l')/2$, где l_{π} — длина полюса по оси машины; l' — длина якоря без вентиляционных каналов. Если $b_{\text{в}}$ — ширина вентиляционного канала, а $n_{\text{в}}$ — число каналов, то $l = l_{\text{я}} - n_{\text{в}} b_{\text{в}}$, где $l_{\text{я}}$ — длина якоря в осевом направлении. Пользуясь расчетными величинами B_{δ} ; b' ; l' , определяем основной магнитный поток машины $\Phi_0 = B_{\delta} b' l' = B_{\delta} \alpha' \tau l'$, откуда $B_{\delta} = \Phi_0 / (\alpha' \tau l')$. Для упрощения расчета зубчатый якорь приводится к гладкому путем увеличения величины действительного воздушного зазора δ до расчетного $\delta' = k_{\delta} \delta$, где $k_{\delta} = (t_1 + 10\delta) / (b_{31} + 10\delta)$ — коэффициент воздушного зазора; $t_1 = \pi D_{\text{я}} / z$ — зубцовый шаг; b_{31} — ширина верхней части зубца по окружности якоря; $D_{\text{я}}$ — диаметр якоря. Необходимая для проведения магнитного потока через зазор намагничивающая сила

$$F_{\delta} = 2B_{\delta} \delta' / \mu_0 = 2B_{\delta} k_{\delta} \delta / \mu_0. \quad (3.5)$$

Н. с. зубцового слоя. При определении магнитной индукции в зубцах якоря могут быть рассмотрены два случая: первый, когда $B_{\delta} < 1,8$ Тл и когда $B_{\delta} > 1,8$ Тл. Принимаем, что в первом случае весь поток проходит через зубцы, во втором — часть потока проходит через пазы. Второй случай является более общим. Расчет н. с. при этом будем вести на один зубцовый шаг. Приходящийся на один зубцовый шаг магнитный поток $\Phi_t = B_{\delta} t_1 l' = \Phi_z + \Phi_{\text{паз}}$, где Φ_z ; $\Phi_{\text{паз}}$ — потоки в зубце и пазу соответственно. Расчетная магнитная индукция

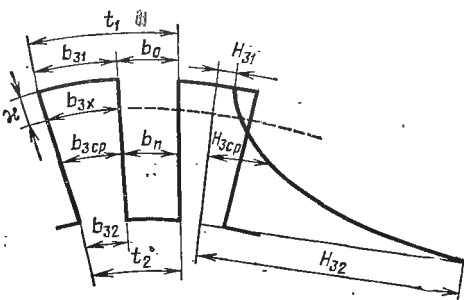


Рис. 3.5. Намагничивающая сила зубцов

$$B'_{\delta} = B_{\delta} + B_{\text{п}} k_{\delta}, \quad (3.6)$$

где $B_{\delta} = \Phi_z / S_z$ — действительная индукция в зубце; $B_{\text{п}} = \Phi_{\text{п}} / S_{\text{п}}$ — индукция паза; k_{δ} — зубцовый коэффициент, определяемый геометрическими размерами зубца и паза. Пользуясь (3.6) и эскизом зубца и паза якоря, находим величину магнитной индукции в верхнем, среднем и нижнем сечениях зубца (рис. 3.5). В зависимости от этих значений индукция по кривым намагничивания зубцов $B_{\delta} = f(H_{\delta})$ (см. рис. 3.2) определяем напряженность магнитного поля зубцов $H_{\delta 1}$; $H_{\delta \text{ф}}$; $H_{\delta 2}$ верхнего, среднего и нижнего сечений. Для зубцов расчетное значение напряженности магнитного поля $H_{\delta} = (H_{\delta 1} + 4H_{\delta \text{ф}} + H_{\delta 2}) / 6$, значение н. с. $F_{\delta} = H_{\delta} 2h_{\delta}$.

Н. с. сердечника якоря, полюсов и станины. Магнитный поток в сердечнике якоря $\Phi_{\text{я}} = 0,5\Phi_0 = B_{\text{я}} S_{\text{я}}$. Площадь поперечного сечения якоря $S_{\text{я}} = h_{\text{я}} l k_{\text{с}}$, где $h_{\text{я}}$ — высота сердечника якоря, $k_{\text{с}} = 0,88 \div$

$\div 0,93$ — коэффициент заполнения сталью. Для сердечника якоря магнитная индукция $B_{\text{я}} = \Phi_0 / (2h_{\text{я}} l k_{\text{с}})$. По кривой намагничивания для стали рассматриваемой марки находим напряженность поля якоря $H_{\text{я}}$, и тогда н. с. сердечника якоря $F_{\text{я}} = H_{\text{я}} L_{\text{я}}$, где $L_{\text{я}}$ — длина средней магнитной линии в сердечнике якоря. В сердечнике полюса магнитная индукция $B_{\text{п}} = \Phi_{\text{п}} / S_{\text{п}} = \Phi_0 k_{\text{с}} / S_{\text{п}}$, где $\Phi_{\text{п}}$ — магнитный поток полюса; $S_{\text{п}}$ — поперечное сечение полюса. По кривой намагничивания стали полюса находим напряженность поля $H_{\text{п}}$, и тогда н. с. полюса $F_{\text{п}} = H_{\text{п}} L_{\text{п}} = H_{\text{п}} 2h_{\text{п}}$, где $h_{\text{п}}$ — высота сердечника полюса. В станине магнитный поток $\Phi_{\text{с}} = 0,5\Phi_{\text{п}} = 0,5\Phi_0 k_{\text{с}}$, индукция $B_{\text{с}} = \Phi_{\text{с}} / S_{\text{с}} = \Phi_0 k_{\text{с}} / (2S_{\text{с}})$. Сечение $S_{\text{с}}$ определяют по геометрическим размерам ярма. По характеристике намагничивания для материала ярма находим напряженность поля $H_{\text{с}}$, тогда н. с. $F_{\text{с}} = H_{\text{с}} L_{\text{с}}$, где $L_{\text{с}} = \frac{\pi}{2p} (D + 2\delta + 2h_{\text{п}} + h_{\text{с}})$ — длина средней магнитной линии в ярме.

§ 3.2. Характеристика намагничивания машины

Зависимость $\Phi_{\delta} = f(F_{\delta})$, построенная в прямоугольных координатах, называется кривой намагничивания машины или магнитной характеристикой (рис. 3.6). В начальной части магнитная характеристика имеет прямолинейный характер, так как при малых значениях потока Φ_{δ} сталь машины слабо насыщена и н. с. затрачивается на проведение потока через зазор. Продолжение прямолинейной части кривой позволяет выделить н. с. для зазора при различных значениях потока Φ_{δ} (линия Ob), т. е. получить зависимость $F_{\delta} = f(\Phi_{\delta})$. По мере увеличения магнитного потока большая часть н. с. затрачивается на проведение потока по стальным участкам. Эта часть н. с. соответствует отрезку bc . По отношению $k_{\text{н}} = ac/ab$, называе-

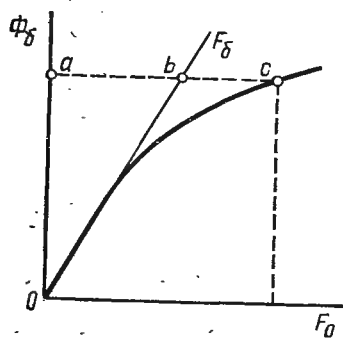


Рис. 3.6. Характеристика намагничивания

мому коэффициентом насыщения, можно судить о степени насыщения магнитной цепи машины при заданном значении потока Φ_{δ} . Строить машину с насыщенную магнитной цепью невыгодно, так как при этом материалы будут недоиспользованы и машина получится тяжелой. Нецелесообразна также чрезвычайно насыщенная магнитная цепь, так как в этом случае необходимо выполнить мощную обмотку возбуждения с большим расходом меди или алюминия и с большими потерями мощности на возбуждение. По этим причинам электрические машины изготовляют с умеренным насыщением при номинальном режиме. При этом рабочая точка лежит несколько выше колена магнитной характеристики. Обычно $k_{\text{н}} = 1,1 \div 1,35$, а в некоторых случаях $k_{\text{н}} \approx 1,7 \div 2$.

§ 4.1. Понятие о реакции якоря

Когда машина работает в режиме холостого хода (х. х.), т. е. при отсутствии тока в обмотке якоря, единственным источником магнитного поля в машине является н. с. обмотки возбуждения, создающая основной поток Φ . При нагрузке электрической машины, когда возникает ток в цепи якоря, состоящей из нескольких обмоток (якоря, добавочных полюсов, последовательного возбуждения и компенсационной), кроме основного магнитного потока, существуют магнитные поля обмоток цепи якоря. Поэтому магнитный поток в воздушном зазоре и пространственное распределение магнитного поля при нагрузке машины будут определяться совместным действием н. с. полюсов и цепи якоря. Таким образом, магнитный поток, который существует в машине при работе ее под нагрузкой, следует рассматривать как результирующий поток, созданный результирующей н. с. Воздействие н. с. якоря на н. с. основных полюсов называют *реакцией якоря*. При анализе этого явления мы воспользуемся методом наложения, для этого отдельно строим распределение основного поля полюсов и поля якоря, а затем совмещаем их в результирующее магнитное поле машины. Этот метод дает правильные результаты в том случае, если при наложении параметры машины не изменяются. Таким параметром является степень насыщения магнитной цепи машины, которую будем считать постоянной величиной. Для выведения выражения н. с. якоря вводится понятие о линейной нагрузке. Для этого зубчатый якорь приводится к гладкому с расчетным воздушным зазором и с равномерно распределенным по окружности якоря слоем проводников. *Линейной нагрузкой* якоря называют число проводов, приходящееся на 1 см длины окружности якоря $A = NI_{\text{я}}/(\pi D)$, где N — число всех проводников обмотки; $I_{\text{я}}$ — ток в проводнике обмотки якоря, A ; D — диаметр якоря, см. Распределение основного потока в двухполюсной машине при х. х., показанное на рис. 4.1, а, имеет симметричный характер как относительно осевой линии dd основных полюсов, так и относительно геометрической нейтральной линии, занимающих неизменное положение в пространстве. Распределение магнитной индукции в зазоре под полюсом представляет собой трапецеидальную кривую (рис. 4.1, б). При вращении якоря по часовой стрелке в его обмотке наводятся э. д. с. в направлениях, показанных на рис. 4.1, а крестами и точками, но ток в обмотке якоря отсутствует, так как цепь разомкнута. На рис. 4.2, а показано распределение магнитного поля якоря. Машина не возбуждена и якорь неподвижен: $I_{\text{в}} = 0$ и $n = 0$. Щетки поставим по линии геометрической нейтральной и подведем к ним ток от какого-нибудь постороннего источника постоянного тока в таком направлении, чтобы направления токов в ветвях обмотки совпадали с направлением э. д. с., изображенными на рис. 4.1, а. В этом случае магнитные

линии поля якоря, направляемым, руководствуясь направлением тока в проводниках обмотки якоря по правилу буравчика, выходят из якоря слева и входят справа. Так как магнитные линии выходят из северного полюса и входят в южный, то

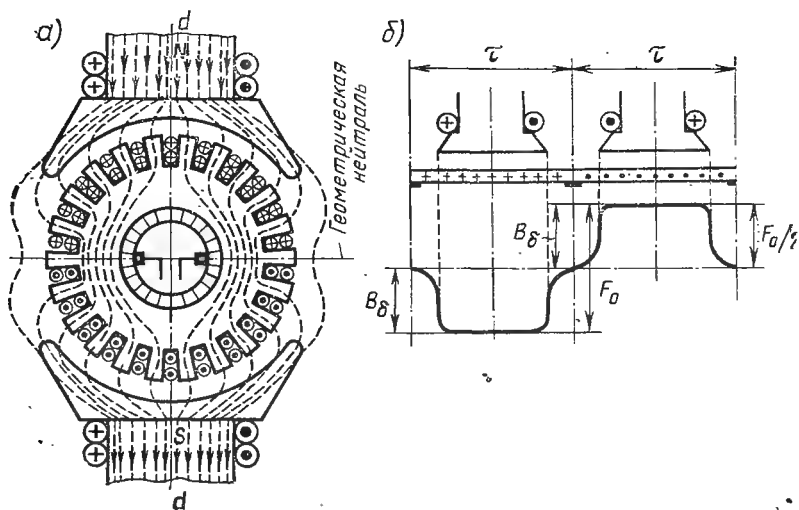


Рис. 4.1. Основной магнитный поток машины при х. х. (а) и кривая распределения н. с. и индукции под главными полюсами (б)

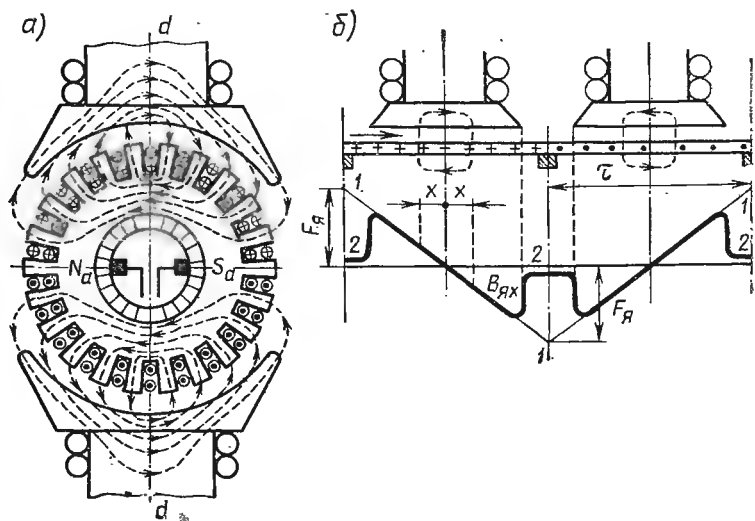


Рис. 4.2. Магнитное поле якоря (а) и кривая н. с. индукции поля якоря (б)

левая сторона якоря обладает северной полярностью, а правая — южной. Такое поле якоря называется поперечным полем и определяется поперечной н. с. якоря $F_{\gamma q}$. Как видно из рис. 4.2, б, якорь

представляет собой электромагнит, ось которого совпадает с линией щеток. Н. с. якоря по линии геометрической нейтрали имеет максимальное значение, так как соответствующая магнитная линия охватывает наибольший ток (кривая 1), однако магнитная индукция от потока якоря в этих точках имеет небольшое значение (кривая 2), что объясняется увеличением магнитного сопротивления потоку якоря в межполюсном пространстве. График магнитной индукции поля якоря имеет седлообразный вид: индукция равна нулю под серединой полюсов и достигает наибольшего значения под краями полюсных наконечников.

§ 4.2. Поперечная и продольная намагничивающие силы якоря

Если щетки стоят на линии геометрической нейтрали qq (рис. 4.3, а), то поле якоря направлено под углом 90° , т. е. поперек осевой линии основных полюсов dd . Такое поле якоря называют

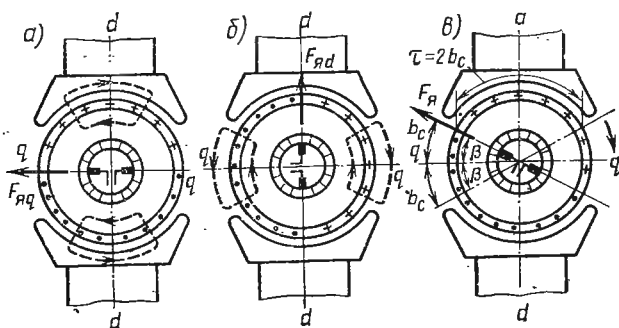


Рис. 4.3. Направление н. с. якоря

поперечным, и определяется оно поперечной н.с. якоря $F_{яq}$. Положение щеток по линии геометрической нейтрали является их первым основным положением. При сдвиге щеток с нейтрали на угол $\pm 90^\circ$ ось поля якоря устанавливается по оси полюсов dd вверх или вниз от оси абсцисс (рис. 4.3, б). Такое поле якоря называют *продольным*, и определяется оно продольной н. с. якоря $F_{яд}$. Положение щеток по осевой линии полюсов — второе основное положение. В общем случае щетки могут быть сдвинуты с нейтрали на угол β или соответственно по окружности

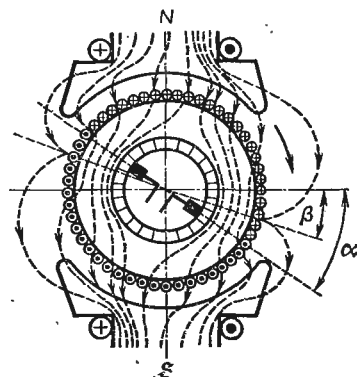


Рис. 4.4. Результирующее магнитное поле машины

якоря на дугу b_c (рис. 4.3, в). В этих условиях можно рассматривать якорь как два совмещенных электромагнита, из которых один, образованный частью обмотки и находящийся в двойном углу 2β , создает продольную н. с. якоря $F_{яд} = 2Ab_c$, а другой, образованный остальной частью обмотки по дуге $\tau - 2b_c$, создает поперечную н. с. якоря $F_{яq} = A(\tau - 2b_c)$.

При нагрузке машины будет иметь место результирующее магнитное поле (рис. 4.4), которое уже не является симметричным относительно оси полюсов. Причина деформации магнитного поля заключается в том, что направления магнитных линий поперечного поля якоря и поля полюсов под сбегающим краем полюса совпадают, отчего результирующее поле под сбегающим краем полюса усиливается, а под набегающим краем полюса эти поля направлены встречно, поэтому результирующее поле уменьшается. Следствием искажения распределения магнитного поля является смещение по направлению вращения физической нейтрали на некоторый угол β , величина которого зависит от нагрузки машины. *Физической нейтралью* называют прямую, проходящую через центр, и точки на окружности якоря с нулевой магнитной индукцией, т. е. прямую, перпендикулярную оси результирующего магнитного поля. Для получения удовлетворительной работы щеток (без искрения) в машинах без дополнительных полюсов щетки приходится сдвигать с геометрической нейтрали в том же направлении на угол α , являющийся несколько большим угла β .

§ 4.3. Реакция якоря

Реакция якоря в генераторе. Чтобы определить в генераторе, какое действие оказывает н. с. якоря на н. с. полюсов, предположим, что якорь вращается по часовой стрелке с некоторой постоянной частотой, а щетки стоят на нейтрали. На рис. 4.5, а показана в развернутом виде пара полюсов. Создаваемое ими основное поле во всех случаях изображается трапецеидальной кривой 1. При вращении якоря в заданном направлении в левой ветви обмотки якоря индуктируются э. д. с., направленные за плоскость чертежа, а в правой — в обратную сторону. В том же направлении проходят по обмотке и токи. Это позволяет построить кривую поля якоря 2. Чтобы получить кривую 3 результирующего поля, нужно в каждой точке сложить ординаты кривых 1 и 2. Мы видим, что под набегающими (левыми) краями полюсов N и S поле якоря стремится ослабить основное поле, т. е. действует размагничивающим образом, а под сбегающими (правыми) усиливает его, т. е. действует намагничивающим образом. Размагничивающее и намагничивающее действия взаимно компенсируются, поэтому результирующий поток машины практически не отличается по величине от основного потока полюсов, если магнитная цепь машины не насыщена, но он искажается, т. е. перестает быть симметричным относительно оси полюсов. При этом точки a и b , в которых результирующее поле проходит через нуль, смещаются относительно геометрической

нейтраль на некоторый угол α по направлению вращения якоря. Через эти точки проходит физическая нейтраль. Обычно индукция под сбегающим краем полюса настолько возрастает, что сталь полюсов и зубцов на этом участке довольно сильно насыщается. Вследствие этого магнитное сопротивление участка увеличивается и распределение индукции определяется кривой 4, проходящей ниже кривой 3 под сбегающим краем полюса. Мы видим, что поле якоря ослабляет основное поле на набегающем крае полюса в большой степени, чем усиливает его на сбегающем, в результате происходит уменьшение основного поля. Если сдвинуть щетки с нейтрали по направлению вращения якоря на угол $+\beta$ (рис. 4.5, б), то кривая 2 поля якоря переместится на угол β по направлению вращения якоря, а кривая 1 основного поля остается на прежнем месте. Сложив ординаты кривых 1 и 2, получим кривую 3 результирующего поля. Не трудно видеть, что поле якоря не только искажает основное поле, но и ослабляет его. Вследствие смещения щеток произошло изменение направления тока на обратное в той части обмотки якоря, которая находится между геометрической нейтралью и каждой из щеток. Таким образом, н. с. реакции якоря генератора, щетки которого сдвинуты с нейтрали по направлению вращения якоря, имеет две составляющие: продольно-размагничивающую н. с., ослабляющую магнитное поле полюсов, и поперечную н. с., искажающую его. Соответственно при сдвиге щеток против направления вращения якоря возникает продольная намагничивающая н. с. реакции якоря. Кривые полей,

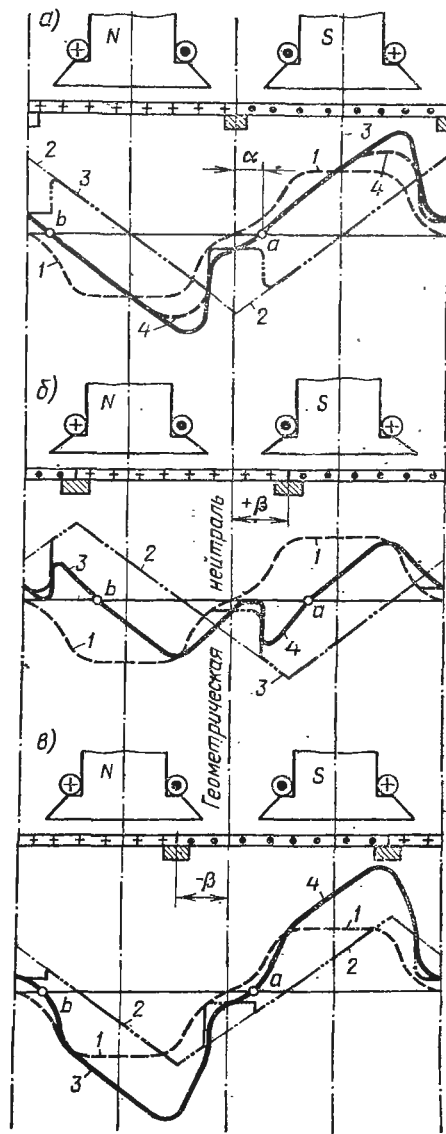


Рис. 4.5. Намагничивающая сила и индукция результирующего поля

отвечающие этому случаю, показаны на рис. 4.5, в. Необходимо, однако, отметить, что сдвиг щеток в генераторе против направления вращения якоря не допускается, так как при этом резко ухудшаются условия безыскровой работы машины.

Реакция якоря в двигателе. При заданных полярности полюсов и направлении вращения якоря наводимые в генераторе и в двигателе э. д. с. имеют одно и то же направление, но токи проходят по обмотке якоря в разных направлениях. Поэтому в двигателе полярность магнитного поля якоря изменяется и реакция якоря в двигателях воздействует на основной магнитный поток иначе, чем в генераторах:

1) при положении щеток на линии геометрической нейтрали поперечная н. с. якоря искажает основное поле, ослабляя его на сбегающем крае полюса и усиливая на набегающем;

2) при сдвиге щеток с нейтрали по вращению якоря в двигателе возникает продольная намагничивающая н. с. якоря. Однако сдвиг щеток в двигателе делают только против направления вращения якоря.

Глава 5 КОММУТАЦИЯ

§ 5.1. Сущность процесса коммутации

Коммутацией называют совокупность явлений, связанных с изменением тока в проводниках обмотки якоря при переходе секций из одной параллельной ветви в другую при замыкании этих секций щетками. Процесс коммутации имеет очень большое значение в теории электрических машин постоянного тока, так как искрение, имеющее место на коллекторе этих машин, большей частью происходит вследствие неправильного протекания этого процесса. На рис. 5.1 представлено распределение токов при коммутации одной секции простой петлевой обмотки для пяти следующих друг за другом положений якоря через интервалы времени $T_K/4$, где T_K — период коммутации. Ширина $b_{щ}$ щетки равна b_K коллекторному делению, толщину изоляции между коллекторными пластинами не учитывают. Предполагается, что нагрузка машины постоянна и ток в каждой параллельной ветви равен $I_{я}$. Короткое замыкание рассматриваемой секции начинается в момент $t=0$ и заканчивается в момент $t=T_K$. Для первого момента времени щетка касается только коллекторной пластины 2, а коммутируемая секция входит в число секций левой параллельной ветви обмотки и в ней протекает ток $i=I_{я}$. Токи в соединительных проводах между коллектором и обмоткой для этого момента времени будут: $i_1=0$ и $i_2=2I_{я}$ (рис. 5.1, а); они соответствуют началу коммутации. В следующий момент (рис. 5.1, б) при вращении коллектора пластина 2 постепенно сбегает со щетки и на смену ей набегают пластина 1.

Для нашего примера левый край щетки называют *набегающим*, а правый — *сбегающим*. Как только щетка войдет в контакт с кол-

лекторной пластины 1, коммутируемая секция окажется замкнутой накоротко щеткой и ток в ней постепенно начнет уменьшаться. Следовательно, через коллекторную пластину 1 будет проходить ток $i_1 = 0,5I_{Я}$, а через пластину 2 протекает больший ток $i_2 = 1,5I_{Я}$, так как площадь соприкосновения пластины 2 со щеткой больше и потому сопротивление контакта между щеткой и коллекторной

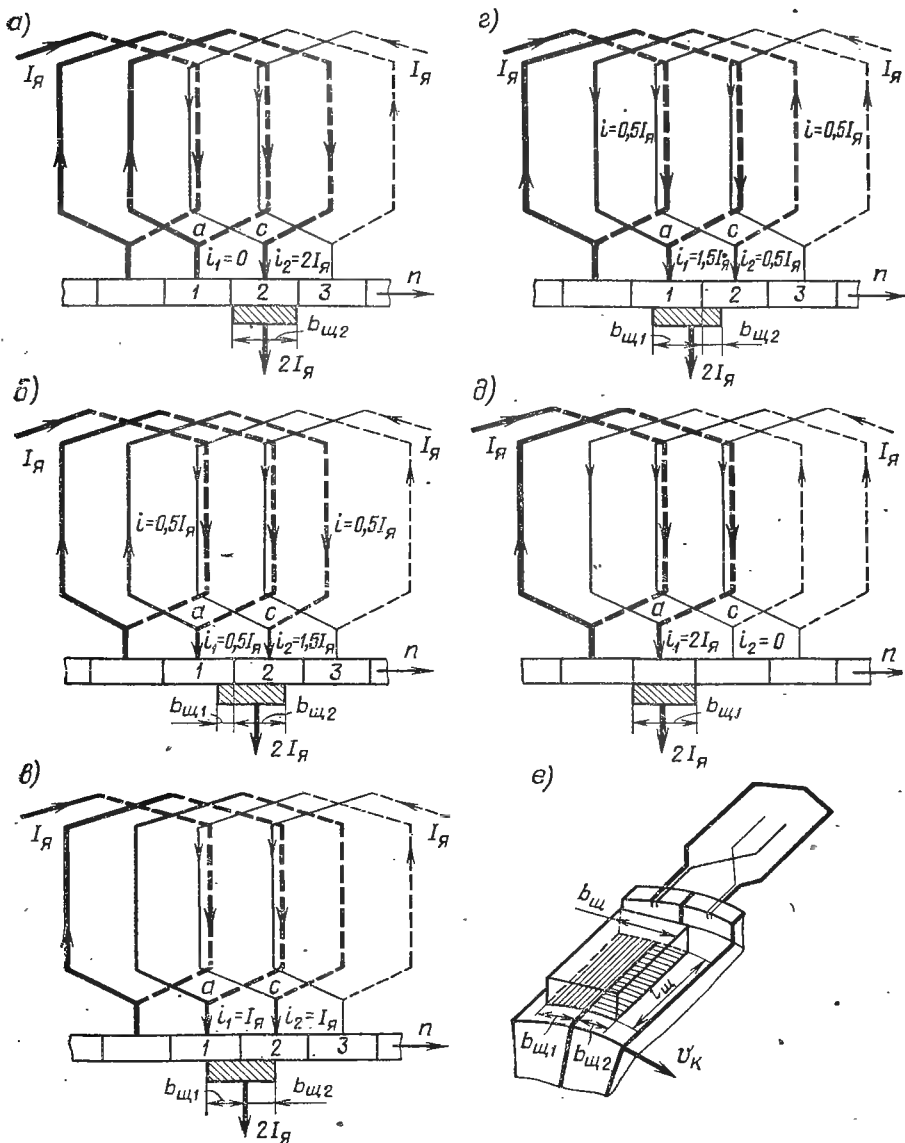


Рис. 5.1. Взаимное положение щетки и коллектора в процессе коммутации

пластиной меньше. Ток в коммутируемой секции будет иметь то же направление, что и до начала коммутации, но величина его будет меньше, чем $I_{\text{я}}$ ($i=0,5I_{\text{я}}$). Когда же контактная поверхность щетки равномерно перекроет обе коллекторные пластины $R_{\text{щ}1}=R_{\text{щ}2}$ (рис. 5.1, в), ток в коммутируемой секции станет равным нулю $i=0$, так как $i_1=i_2=0,5I_{\text{я}}$. Для последующего момента времени (рис. 5.1, г) токи в соединительных проводах примут значения: $i_1=1,5I_{\text{я}}$, $i_2=0,5I_{\text{я}}$. В конце коммутации для пятого момента времени (рис. 5.1, д) щетка будет полностью касаться коллекторной пластины 1 и коммутируемая секция уже не будет замкнута коротко щеткой. При этом она будет принадлежать первой параллельной ветви обмотки якоря, и ток в ней становится равным $I_{\text{я}}$, но противоположно направленным току в начале коммутации. Токи в соединительных проводах $i_1=2I_{\text{я}}$ и $i_2=0$. Общий ток равен $2I_{\text{я}}$. Таким образом, за время перехода щетки с коллекторной пластины 2 на пластину 1 произошло изменение тока в коммутируемой секции от $+I_{\text{я}}$ до 0 и от 0 до $-I_{\text{я}}$. Указанное изменение тока происходит очень быстро: 0,0003—0,001 с. На рис. 5.1, е изображено положение щетки на коллекторных пластинах в процессе коммутации.

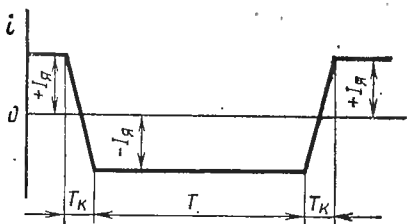


Рис. 5.2. График изменения тока секции во времени

На рис. 5.2 представлен график изменения тока в секции по времени при переходе ее дважды из одной параллельной ветви в другую. Время T_K , в течение которого происходит процесс коммутации в секции, называют *периодом коммутации*. За время T секции передвигаются между щетками различной полярности. Короткозамкнутый контур (см. рис. 5.1, б) состоит из секции, двух коллекторных пластин и щетки; сопротивлениями самой секции и соединительных проводников между секцией и коллекторными пластинами пренебрегаем, так как они незначительны по сравнению с сопротивлениями переходного контакта между щеткой и коллекторными пластинами. Обозначив сопротивления переходных контактов сбегающего и набегающего краев щетки через $R_{\text{щ}2}$ и $R_{\text{щ}1}$, составим уравнение по второму закону Кирхгофа: $\sum e=0$. Это предположение соответствует, например, если $n \approx 0$ или полному уравновешиванию всей суммы э. д. с. в контуре секции:

$$\sum e = R_{\text{щ}2}i_2 - R_{\text{щ}1}i_1 = 0. \quad (5.1)$$

Кроме того, для узлов a и c по первому закону Кирхгофа

$$i_1 = I_{\text{я}} - i; \quad i_2 = I_{\text{я}} + i, \quad (5.2)$$

где i — ток коммутируемой секции.

Изменение тока секции i определяется только изменением $R_{\text{щ}1}$ и $R_{\text{щ}2}$, вследствие чего этот случай называют *коммутацией сопро-*

тивлением. В рассматриваемые моменты времени щетка перекрывает по ширине участки коллекторных пластин: $b_{щ1} = v_k t$; $b_{щ2} = v_k (T_k - t)$; $b_{щ} = v_k T_k$, где v_k — окружная скорость коллектора. Площади касания щетки с коллекторными пластинами 2 и 1 будут: $S_1 = b_{щ1} l_{щ}$; $S_2 = b_{щ2} l_{щ}$, полная площадь контакта $S_{щ} = b_{щ} l_{щ}$, где $l_{щ}$ — длина щеток. Учитывая, что контактное сопротивление обратно пропорционально площади контакта, выражения для переходных сопротивлений между щеткой и коллекторной пластиной запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_{щ1}/R_{щ} &= S_{щ}/S_1 = l_{щ} v_k T_k / (l_{щ} v_k t) = T_k / t; \\ R_{щ2}/R_{щ} &= S_{щ}/S_2 = l_{щ} v_k T_k / [l_{щ} v_k (T_k - t)] = T_k / (T_k - t), \end{aligned}$$

откуда

$$R_{щ1} = R_{щ} T_k / t; \quad R_{щ2} = R_{щ} T_k / (T_k - t). \quad (5.3)$$

Подставляя в (5.1) значения токов i_1 и i_2 из (5.2) и сопротивлений $R_{щ1}$ и $R_{щ2}$ из (5.3), получим

$$i = I_{я} (R_{щ} - R_{щ2}) / (R_{щ1} + R_{щ2}) = I_{я} (1 - 2t/T_k). \quad (5.4)$$

Коммутацию, соответствующую изменению тока по (5.4), называют *прямолинейной*, так как ток в короткозамкнутой секции изменяется по прямолинейному закону. На рис. 5.3 показан график изменения тока в коммутируемой секции $i = f(t)$, построенный согласно (5.4). Прямолинейная коммутация является наиболее благоприятной, так как только при ней обеспечивается одно из основных условий работы щеток без искрения, а именно — равномерная плотность тока под щетками:

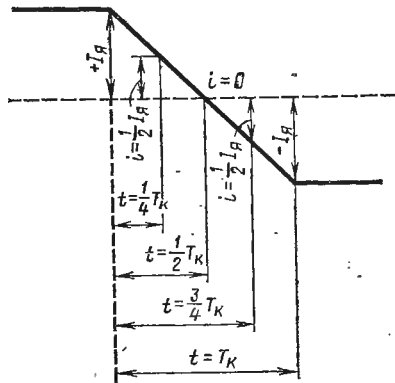


Рис. 5.3. График прямолинейной коммутации

$$j_{щ1} = i_1 / S_{щ1} = 2I_{я} / (l_{щ} b_{щ}); \quad j_{щ2} = i_2 / S_{щ2} = 2I_{я} / (l_{щ} b_{щ}). \quad (5.5)$$

§ 5.2. Замедленная и ускоренная коммутации

В действительности $\Sigma e \neq 0$. В коммутируемой секции возникают э. д. с. самоиндукции e_L , взаимоиндукции e_M и вращения e_K .

Э. д. с. самоиндукции e_L . Так как период коммутации очень мал ($\approx 10^{-4}$ с), то в коммутируемой секции возникает э. д. с. самоиндукции $e_L = -L(di/dt)$ (L — индуктивность секции), которая стремится замедлить коммутацию, так как в результате самоиндукции изменение тока в цепи всегда замедляется.

Э. д. с. взаимоиндукции e_M . Обычно щетка машины перекрывает несколько коллекторных пластин, т. е. $b_{щ} > b_k$. Поэтому коммутация

происходит одновременно в нескольких секциях, которые могут находиться как в одном и том же пазу, так и в рядом лежащих, следовательно, в коммутируемых секциях возникают э. д. с. взаимной индукции $e_M = -M(di/dt)$, где M — взаимная индуктивность одновременно коммутируемых секций. Э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции создают результирующую реактивную э. д. с. $e_p = e_L + e_M$, которая препятствует процессу изменения тока в коммутируемой секции.

Э. д. с. вращения e_K . Кроме э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции в короткозамкнутой секции при вращении якоря индуцируется э. д. с. вращения e_K , вызванная тем, что стороны короткозамкнутой секции пересекают внешнее магнитное поле, которое может возбуждаться в зоне коммутации. Поле реакции якоря и внешнее поле, создаваемое добавочными полюсами, образуют в зоне коммутируемых секций коммутирующее поле. Это поле индуцирует э. д. с. вращения, направление которой зависит от направления магнитных линий поля и направления вращения якоря: $e_K = 2B_K l v \omega_c$, где B_K — магнитная индукция коммутирующего поля; l — длина активных сторон секции; v — линейная скорость движения секции; ω_c — число втков в секции.

Таким образом в коммутирующей секции возникает сумма э. д. с. $\Sigma e = e_p + e_K$. С учетом (5.1), (5.2) и (5.3) ток в коммутируемой секции

$$i = I_{\text{я}} \frac{R_{\text{ш1}} - R_{\text{ш2}}}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} + \frac{\Sigma e}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} = I_{\text{я}} \left(1 - \frac{2t}{T_K} \right) + \frac{\Sigma e}{R_{\text{ш}} T_K^2} (T_K - t) t = i_{\text{л}} + i_{\text{к}}, \quad (5.6)$$

где $i_{\text{л}} = I_{\text{я}}(1 - 2t/T_K)$ — ток прямолинейной коммутации; $i_{\text{к}} = \frac{\Sigma e}{R_{\text{ш}} T_K^2} (T_K - t) t$ — добавочный ток коммутации.

Действие добавочного тока коммутации зависит от направления Σe . При $\Sigma e > 0$ ток $i_{\text{к}}$, складываясь с линейным током $i_{\text{л}}$, вызывает замедленный процесс коммутации. Когда ток i проходит через нулевое значение за время, прошедшее от начала коммутации $t_{\text{к}} > T_K/2$, то плотность тока под сбегающим краем щетки больше, чем под набегающим, что может стать причиной возникновения искрения под сбегающим краем щетки. Размыкание контура короткозамкнутой секции подобно выключению или разрыву цепи с R и L .

На рис. 5.4, а изображен график криволинейной замедленной коммутации. Для сравнения на том же рисунке показан и график прямолинейной коммутации. При $\Sigma e < 0$ добавочный ток коммутации $i_{\text{к}}$ имеет противоположный знак и характер изменения токов будет ускоренный (рис. 5.4, б). В этом случае токи i ; i_1 и i_2 изменяются быстро в начале коммутации и медленно в конце. Ток и плотность тока под набегающим краем щетки уже в начале коммутации становятся большими. В конце же процесса ускоренной

коммутации ток, а также плотность тока под сбегающим краем щетки малы. Поэтому размыкание цепи короткозамкнутой секции при такой ускоренной коммутации происходит в благоприятных условиях подобно размыканию цепи с малым током. Замедленная коммутация неблагоприятна и нежелательна, а слегка ускоренная, наоборот, желательна, поэтому на практике стремятся достичь именно такой коммутации.

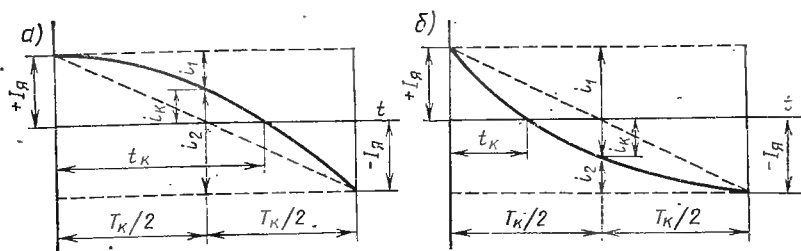


Рис. 5.4. Криволинейная коммутация

§ 5.3. Причины искрения щеток

Согласно ГОСТ 183—74 степень искрения на коллекторе должна оцениваться по шкале искрения (классам коммутации), приведенной в табл. 5.1. Степень искрения коллекторных машин указывают в стандартах на отдельные виды машин, а при отсутствии стандартов — в технических условиях (ТУ) на эти машины. Если степень искрения машин не оговорена, то она при нормальном режиме работы машины должна быть не выше $1\frac{1}{2}$.

Механические причины искрения щеток. Они обусловлены неровностью поверхности коллектора, выступанием слюдяных изолирующих прокладок между пластинами коллектора, вибрацией щеточного устройства, неправильным расположением и неравномерным давлением щеток и др.

Причины потенциального характера. Испытания показали, что коммутация проходит нормально, если максимальное значение напряжения между коллекторными пластинами $25 \div 35$ В для машин большой и средней мощности и $50 \div 60$ В для машин малой мощности. Если это напряжение выходит за указанные пределы, то между соседними пластинами появляется искрение или даже дуга.

Причины электромагнитного характера обусловлены величиной запаса электромагнитной энергии коммутируемой секции $0,5L_c i^2$ в момент ее размыкания. Разряд электромагнитной энергии и является причиной искрения. Таким образом, причины электромагнитного характера зависят от величины реактивной э.д.с. e_p и вызываемого ею добавочного тока коммутации i_K . Сильное искрение может перейти в круговой огонь на коллекторе, что приводит к повреждению щеточно-коллекторного устройства машины.

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения	Отсутствие почернения на коллекторе и следов нагара на щетках
1 1/4	Слабое искрение под небольшой частью края щетки	
1 1/2	Слабое искрение под большей частью края щетки	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щетках, легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузке	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щетках, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином
3	Значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и частичное разрушение щеток

§ 5.4. Основные средства улучшения коммутации

Основная причина неудовлетворительной коммутации в машинах постоянного тока — добавочный ток коммутации $i_k = \Sigma e / \Sigma R_k = (e_p \pm e_k) / \Sigma R_k$, где R_k — сумма электрических сопротивлений добавочному току коммутации i_k . В сумму входят сопротивления секций, пайки в «петушках», контактное между щеткой и коллектором, и щетки. Однако из перечисленных сопротивлений наибольшую величину имеют контактное сопротивление и сопротивление щетки. Уменьшения тока i_k можно достичь следующими способами: уменьшением реактивной э.д.с e_p ; созданием в коммутирующей зоне магнитного поля такой величины и такой полярности, чтобы э.д.с. вращения e_k скомпенсировала бы э.д.с e_p ; увеличением сопротивления ΣR_k . Реактивная э.д.с. e_p может быть уменьшена чисто конструктивными методами. Для этого надо при проектировании машины предусматривать секции с укороченным шагом и с возможно меньшим числом витков, уменьшать частоту вращения и линейную нагрузку якоря, устанавливать соответствующие размеры щеток, коллектора и секций. Однако выполнение всех этих условий может быть испол-

зовано лишь в ограниченной степени из-за увеличения габаритов машины и соответственно ее стоимости.

Для создания в зоне коммутации магнитного поля, индуцирующего компенсирующую э.д.с. вращения e_k , в машинах постоянного тока применяют добавочные полюсы (рис. 5.5). Намагничивающая сила добавочных полюсов должна обеспечивать магнитную индукцию B_k в зоне коммутации такой величины, чтобы э.д.с. вращения e_k была равна э.д.с. e_p по величине и противоположна по направлению,

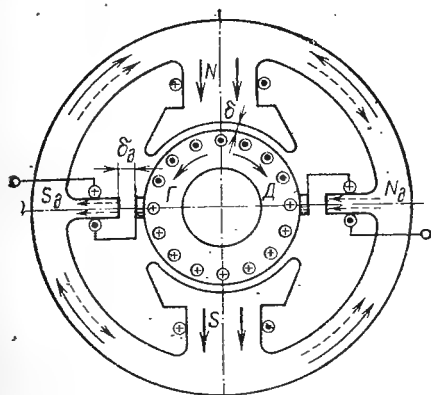


Рис. 5.5. Полярность добавочных полюсов при работе машины генератором Г и двигателем Д

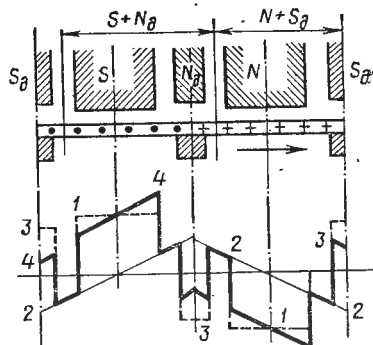


Рис. 5.6. Намагничивающая сила генератора с добавочными полюсами

т. е. чтобы для любого момента времени выполнялось равенство $e_p - e_k = 0$. На рис. 5.6 показаны н. с. генератора с добавочными полюсами. Кривая 1 представляет собой н.с. главных полюсов, кривая 2 — н.с. якоря, кривая 3 — н.с. добавочных полюсов, кривая 4 — результирующую н.с. генератора с добавочными полюсами, полученную путем сложения ординат кривых 1, 2 и 3. Кроме того, магнитный поток добавочных полюсов должен быть направлен навстречу поперечному потоку реакции якоря, т. е. компенсировать размагничивающее и искажающее действие поперечной реакции якоря в зоне между главными полюсами. Поэтому полярность добавочного полюса в генераторе должна быть такой же, как и у следующего по направлению вращения главного полюса, а в двигателе — как у предшествующего главного полюса рис. 5.5.

Так как н.с. поперечной реакции якоря и реактивная э.д.с. e_p пропорциональны току якоря, то для их компенсации н.с. добавочного полюса и магнитная индукция B_k также должны быть пропорциональны току якоря. Для удовлетворения этого условия обмотку добавочных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря, а добавочные полюсы выполняют ненасыщенными при номинальной нагрузке машины. Для этого увеличивают зазор под добавочным полюсом по сравнению с зазором под главным полюсом; берут индукцию в сердечнике добавочного полюса не более $0,8 \div 1$ Тл, чтобы не

сказывалось насыщение стали. Число добавочных полюсов обычно равно числу главных полюсов, и только в машинах малой мощности их иногда уменьшают в два раза. Добавочные полюсы располагают между главными полюсами по линиям геометрических нейтралей. Щетки устанавливают по этим же линиям и оставляют в этом положении при всех нагрузках.

В машинах без добавочных полюсов магнитное поле, необходимое для создания компенсирующей э.д.с. вращения, можно получить сдвигом щеток с геометрической нейтрали (рис. 5.7). Предположим, что машина работает генератором и якорь вращается по часовой

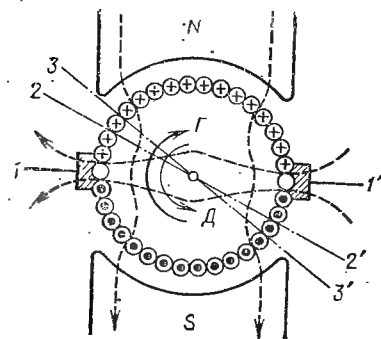


Рис. 5.7. Сдвиг щеток для улучшения коммутации

стрелке. Если щетки установлены на геометрической нейтрали 1—1', то в зоне коммутации имеется только поперечное поле якоря. При вращении в этом поле коммутируемых секций в них будет наводиться э. д. с., направленная так же, как они были направлены до вступления секций в зону коммутации. Следовательно, э. д. с. вращения e_k , обусловленные поперечным полем якоря, будут действовать в том же направлении, что и э. д. с. самоиндукции e_L и э. д. с. взаимной индукции e_m , и будут замедлять процесс коммутации. Если щетки передвинуть в

зону 2—2', где поле якоря полностью компенсировано полем полюсов (физическая нейтраль), то э. д. с. вращения e_k в коммутируемых секциях были бы равны нулю, однако э. д. с. e_L и e_m по-прежнему замедляли бы процесс коммутации. Для того чтобы скомпенсировать и эти э. д. с., необходимо щетки сдвинуть еще дальше — в положение 3—3', где результирующее поле в воздушном зазоре имеет направление, обратное направлению поля тех полюсов, под которыми секции находились до начала коммутации. Как видно из рис. 5.7, для создания коммутирующего поля необходимо сдвигать щетки с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря в генераторном режиме и против направления вращения в режиме двигателя. Недостаток рассмотренного метода — в том, что коммутирующее поле не изменяется автоматически пропорционально току якоря, и требуемая компенсация поля якоря и э. д. с. e_L и e_m получается лишь при определенной нагрузке машины. При других нагрузках условия коммутации получаются менее благоприятными. Осуществить автоматическое изменение сдвига щеток при изменении нагрузки практически невозможно.

Увеличение сопротивления цепи коммутируемой секции в принципе возможно за счет выполнения «петушков» с повышенным сопротивлением. Однако это приводит к уменьшению к.п.д. машины, а также к увеличению плотности тока у сбегающего края щетки. Кроме того, такие «петушки» ненадежны в работе. Существенным

является подбор щеток с надлежащими характеристиками и сохранение оксидной пленки на поверхности коллектора. При выборе марки щеток часто приходится находить компромиссное решение взаимно противоречивых требований. Например, с точки зрения улучшения коммутации выгодно выбирать твердые сорта щеток. Однако это приводит к повышенному износу коллектора и к увеличению размеров всего щеточного аппарата и коллектора вследствие меньшей допустимой плотности тока этих сортов щеток. В настоящее время в машинах обычного исполнения широко применяют графитные щетки, в машинах с более тяжелым режимом работы — угольнографитные и электрографитные, в низковольтных машинах — медно- или бронзографитные. На контактное

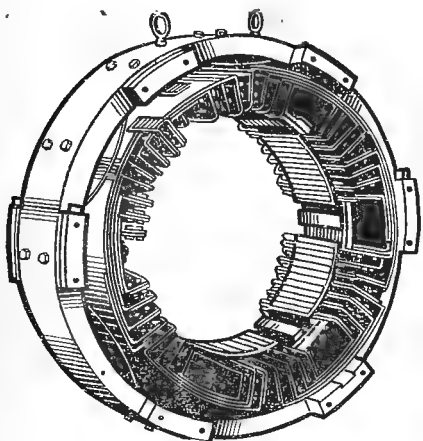


Рис. 5.8. Станина машины постоянного тока с компенсационной обмоткой

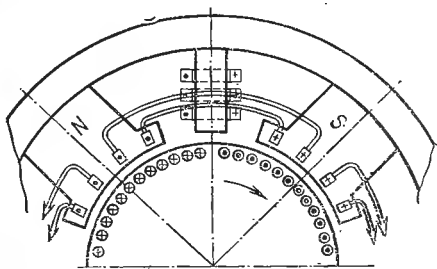


Рис. 5.9. Направление тока в компенсационной обмотке

сопротивление между щеткой и коллектором большое влияние оказывает химическое состояние поверхности коллектора. При нормальной работе коллектор должен быть покрыт тонкой оксидной пленкой, обладающей повышенными прочностью и электрическим сопротивлением. Добавочные полюсы компенсируют действие реакции якоря только в междуполюсном пространстве (в зоне коммутации). Непосредственно под главными полюсами реакция якоря остается некомпенсированной, что приводит к искажению основного поля и резкой разнице между э. д. с., наведенными в соседних секциях обмотки якоря, вследствие чего возникает искрение потенциального характера: Для компенсации реакции якоря в зоне главных полюсов применяют компенсационную обмотку (рис. 5.8).

В пазу полюсных наконечников укладывают изолированные проводники, которые соединяют так, что они образуют обмотку с магнитной осью, совпадающей с геометрической нейтралью (рис. 5.9). Компенсационную обмотку включают последовательно с обмоткой якоря. Намагничивающая сила компенсационной обмотки распределена по длине полюсной дуги, ее направление противополо-

ложно направлению н.с. поперечной реакции якоря и равна ей по величине. Наличие компенсационной обмотки повышает надежность работы машины, увеличивая ее стоимость и потери в цепи якоря, поэтому ее применяют в машинах малой мощности, работающих в тяжелых условиях (тяговые электродвигатели, крановые), а также в машинах большой мощности с резкими колебаниями нагрузки (электродвигатели прокатных станков).

§ 5.5. Коммутационная реакция якоря

При отклонении коммутации от прямолинейной токи в коммутируемых секциях создают дополнительную реакцию якоря. Под *коммутационной реакцией якоря* понимают действие н.с., создаваемой токами коммутируемых секций, на основной поток машины. Если

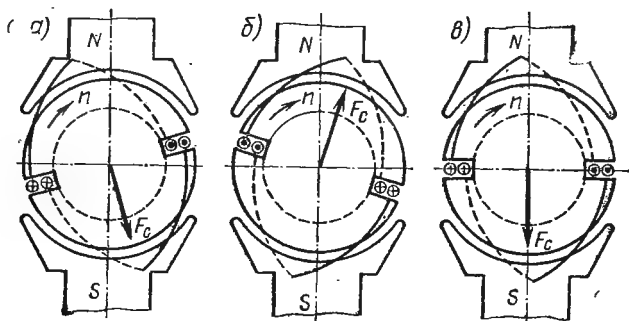


Рис. 5.10. Направление н. с. переключаемой секции (для режима двигателя)

ток в секции изменяется прямолинейно, то в этом положении секция не оказывает влияния на магнитный поток главного полюса. В течение времени $0 < t < 0,5T_k$ магнитная сеть F_c секции располагается по одну сторону геометрической нейтрали (рис. 5.10, а), а при $0,5T_k < t < T_k$ — по другую ее сторону (рис. 5.10, б). Поперечная составляющая н.с. переключаемой секции сохраняет неизменное направление и с н.с. других секций обмотки создает поперечную реакцию якоря. Продольная составляющая н.с. переключаемой секции при $t = 0,5T_k$ изменяет направление на противоположное, и ее намагничивающее действие (в режиме двигателя) за первую половину периода коммутации компенсируется размагничивающим действием за вторую половину T_k . При замедленной коммутации ток в переключаемой секции в течение большей части периода коммутации сохраняет направление тока до переключения, следовательно, точка перехода тока в секции через нуль сдвигается по вращению якоря и переключаемая секция оказывает размагничивающее действие на главные полюсы в генераторе и намагничивающее действие в двигателе (рис. 5.10, в). При ускоренной коммутации ток в переключаемой секции достигает нулевого значения за время $t < 0,5T_k$

и точка перехода тока в секции через нуль сдвигается против вращения якоря; в этом случае коммутационная реакция якоря будет намагничивающей в генераторе и размагничивающей в двигателе. При нормальной работе машины н.с. коммутационной реакции якоря мала по сравнению с н.с. обмотки возбуждения главных полюсов и не оказывает влияние на магнитный поток машины. При большом токе якоря, например к.з. генератора или при пуске двигателя, когда вследствие насыщения магнитной цепи добавочных полюсов преобладает реактивная э.д.с. и коммутация становится очень замедленной, н.с. коммутационной реакции значительно возрастает и может оказывать существенное влияние на работу машины.

§ 5.6. Экспериментальная проверка и наладка коммутации

Ввиду сложности коммутационного процесса теория коммутации основывается на ряде допущений и упрощений. В результате не удастся определить точное число витков добавочного полюса, установить точную величину зазора под добавочным полюсом и др. Практика электромашиностроения показывает, что вновь изготавливаемые машины почти всегда нуждаются в настройке коммутации, которая состоит, главным образом, в регулировке добавочных полюсов — изменении сопротивления магнитной цепи или н.с. их обмотки возбуждения.

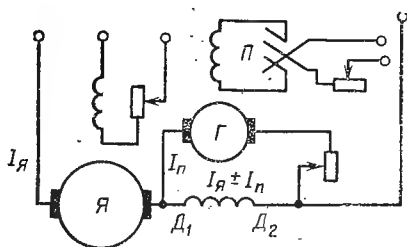


Рис. 5.11. Схема для снятия кривых подпитки

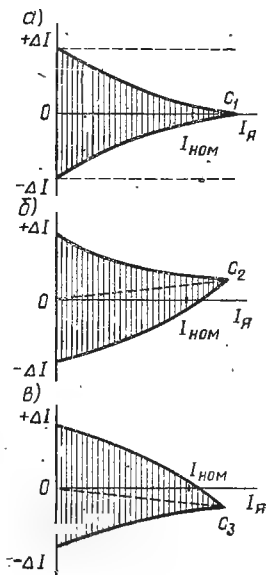


Рис. 5.12. Кривые подпитки при коммутациях

Наиболее распространенный метод экспериментального анализа коммутации — снятие кривых подпитки добавочных полюсов. В 1934 г. В. Т. Касьяновым и М. П. Костенко на заводе «Электросила» им. С. М. Кирова был разработан способ снятия безыскровой зоны работы машины, сущность которого в том, что обмотку добавочных полюсов подпитывают от особого источника постоянного

тока и снимают подпиточные кривые, которые позволяют вывить зону безыскровой работы и с необходимой точностью определить наивыгоднейшее число витков добавочного полюса и величину зазора δ . Для этого собирают схему, показанную на рис. 5.11, где $Я$ — якорь испытуемой машины; $D_1 D_2$ — обмотка добавочных полюсов; G — генератор постоянного тока независимого возбуждения для подпитки добавочных полюсов; $П$ — переключатель для изменения полярности генератора G .

При испытании машина может работать как в нагрузочном режиме, так и в режиме к.з. Снятие кривых подпитки начинают с холостого хода ($I_A = 0$). Подпитывая добавочные полюсы сначала в одном направлении, а затем в другом, мы можем установить величину тока $\Delta I_{\Pi} = \pm I_{\Pi} 100\% / I_{\text{ном}}$, при котором начинается первое заметное на глаз искрение. Причина искрения — избыточная э.д.с. $\Delta e = \pm e_{\kappa}$, создаваемая в коммутируемой секции полем добавочных полюсов. Если в машине постоянного тока реактивная и коммутирующая э.д.с. e_p и e_{κ} находились бы всегда во взаимном равновесии, то кривые подпитки имели бы вид двух прямых, параллельных оси абсцисс и находящихся от нее на одинаковом расстоянии. Но так как в машинах нельзя добиться полной компенсации э.д.с. e_p , то остаточная э.д.с. растет с увеличением нагрузочного тока I , при некотором значении которого машина начинает искрить даже при правильно подобранном числе витков добавочных полюсов.

Таким образом, машину можно нагрузить лишь до такого предельного тока, при котором уже никакой регулировкой добавочных полюсов невозможно получить удовлетворительную коммутацию. Кривые подпитки (рис. 5.12) не параллельны оси абсцисс, а пересекаются в точках c_1 , c_2 или c_3 в зависимости от того, в каком соотношении находятся между собой э.д.с. e_p и e_{κ} . Если они скомпенсированы, т. е. число витков добавочных полюсов подобрано правильно, то кривые подпитки пересекутся в точке c_1 на оси абсцисс и средняя линия этих кривых совпадет с осью абсцисс — линейная коммутация (рис. 5.12, а). Если при работе машины без подпитки преобладает реактивная э.д.с. e_p и, следовательно, коммутация носит замедленный характер, то нужно подпитывать добавочные полюсы в положительном направлении, усиливая создаваемое ими поле в зоне коммутации. В этом случае средняя линия кривой пойдет выше оси абсцисс и точка пересечения кривых c_2 — замедленная коммутация (рис. 5.12, б). Если преобладает э.д.с. e_{κ} , то нужно подпитывать добавочные полюсы в отрицательном направлении, ослабляя создаваемое ими поле. В этом случае средняя линия кривой подпитки пойдет ниже оси абсцисс к точке пересечения кривых c_3 — ускоренная коммутация (рис. 5.12, в). Сопоставляя между собой эти кривые, легко видеть, что в первом случае машина может работать без искрения при больших перегрузках, чем во втором и третьем. Кривые подпитки позволяют определить наивыгоднейшее число витков добавочного полюса при заданной величине зазора под добавочным полюсом или наивыгоднейший размер этого зазора при заданном числе витков добавочного полюса. Первый способ обычно применя-

ют в машинах малой и средней мощности, второй — в машинах большой мощности с малым числом витков добавочного полюса. Кроме того, кривые подпитки дают возможность предопределять в известных пределах условия коммутации при изменении режима работы машины.

§ 5.7. Средства уменьшения радиопомех

Процесс коммутации машин постоянного тока сопровождается образованием высокочастотных электромагнитных волн, которые вызывают помехи в радиоприемных и телевизионных устройствах. Процесс выпрямления э. д. с. при помощи коллектора может также явиться источником радиопомех. Однако интенсивность радиопомех зависит от степени искрения под щетками, вызывающими непрерывный треск и шум в радиоприемной аппаратуре. Поэтому уровень радиопомех не должен превосходить уровня норм, установленных стандартом. Для уменьшения радиопомех применяют электрические фильтры, экранируют машины и симметрируют обмотки, включенные последовательно с якорем. В некоторых случаях для улучшения фильтрации высокочастотных напряжений и токов включают фильтр, состоящий из конденсаторов, соединяемых параллельно с якорем, и индуктивных катушек, включаемых последовательно с ним (рис. 5.13).

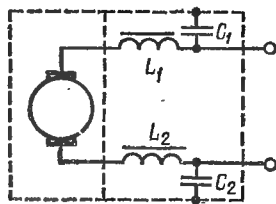


Рис. 5.13. Схема защиты от радиопомех в электрических машинах

Глава 6

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 6.1. Общие сведения о генераторах постоянного тока

В тех случаях, когда по условиям производства необходим или предпочтителен большой ток (предприятия химической и металлургической промышленности, транспорт и др.), его получают, преобразуя переменный ток в постоянный с помощью преобразователей. В качестве последних широко применяют установки двигатель-генератор. Первичными источниками энергии генераторы постоянного тока работают, главным образом, в изолированных установках (как возбудители синхронных машин), на автомашинах, самолетах, при сварке дугой, для освещения поездов, на кораблях и др.

Таким образом, область применения генераторов постоянного тока достаточно широка и соответственно многообразны предъявляемые к ним требования в отношении мощностей, напряжений, частот вращения, надежности работы, срока службы и др. Для работы генератора необходимо наличие в нем магнитного поля. В зависимости от способа создания магнитного поля генераторы делят на

генераторы независимого возбуждения с электромагнитным возбуждением, с возбуждением постоянными магнитами (магнитоэлектрические) и с самовозбуждением, в которых ток для обмотки возбуждения поступает от якоря генератора. При независимом возбуждении генератора обмотка возбуждения его получает питание от независимого источника постоянного тока. Магнитоэлектрическое возбуждение находит применение лишь в машинах очень малой мощности. При самовозбуждении возможны три варианта соединения обмотки возбуждения с обмоткой якоря: параллельное (шунтовое), последовательное (сериесное) и смешанное (компаундное). В соответствии с этим различают генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения, имеющие две обмотки возбуждения: одну включенную параллельно, а другую — последовательно.

Характеристики генератора постоянного тока. Свойства генераторов анализируют с помощью характеристик, устанавливающих зависимости между основными величинами, определяющими работу генератора: э.д.с. E , напряжение на зажимах генератора U , ток возбуждения $I_{\text{в}}$, ток в якоре $I_{\text{я}}$ и частота вращения n . Так как генераторы чаще всего работают с постоянной частотой вращения, то основную группу характеристик снимают при неизменной частоте вращения ($n = \text{const}$). Напряжение U имеет наибольшее значение, поскольку оно определяет свойства генератора в отношении той сети, на которую он работает. Поэтому основными характеристиками являются:

1) нагрузочная $U = f(I_{\text{в}})$ при $I_{\text{я}} = \text{const}$. В частном случае, когда $I_{\text{я}} = 0$, нагрузочная характеристика переходит в характеристику х.х., имеющую важное значение для оценки генератора и построения других характеристик;

2) внешняя $U = f(I_{\text{я}})$ при $R_{\text{в}} = \text{const}$;

3) регулировочная $I_{\text{в}} = f(U)$ при $U = \text{const}$. В частном случае, когда $U = 0$, регулировочная характеристика переходит в характеристику к.з. $I_{\text{к}} = f(I_{\text{в}})$. Режим работы электрической машины при условиях, для которых она предназначена, называют *номинальным режимом работы*. Номинальный режим работы характеризуется величинами, обозначенными на заводском щитке машины как номинальные: напряжение, мощность, ток, частота вращения. *Номинальной мощностью* генератора постоянного тока называют полезную электрическую мощность машины, выраженную в ваттах или киловаттах. Термин «номинальный» может относиться и к величинам, не указанным на паспортном щитке машины, но характеризующим номинальный режим работы: такие, как момент, ток возбуждения, к.п.д.

Энергетический процесс и уравнение э.д.с генератора постоянного тока. В основе работы генератора лежит процесс преобразования подводимой к нему механической энергии в электрическую. Рассмотрим процесс преобразования энергии на примере генератора независимого возбуждения, приводимого во вращение с постоян-

ной частотой ($n = \text{const}$). При независимом возбуждении мощность $P_{\text{в}}$, необходимая для покрытия потерь в цепи возбуждения, не входит в мощность P_1 , подводимую к генератору от первичного двигателя (рис. 6.1). При преобразовании энергии часть мощности P_1 тратится на покрытие механических потерь $P_{\text{мх}}$ и потерь в стали $P_{\text{с}}$, а оставшаяся часть преобразовывается в электромагнитную мощность

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}} = P_1 - (P_{\text{мх}} + P_{\text{с}}). \quad (6.1)$$

Полезная мощность $P_2 = UI_{\text{я}}$, отдаваемая генератором в сеть, меньше мощности $P_{\text{эм}}$ на величину электрических потерь $P_{\text{м}} + P_{\text{щ}}$ в цепи якоря и в щеточных контактах:

$$P_2 = P_{\text{эм}} - (P_{\text{м}} + P_{\text{щ}}). \quad (6.2)$$

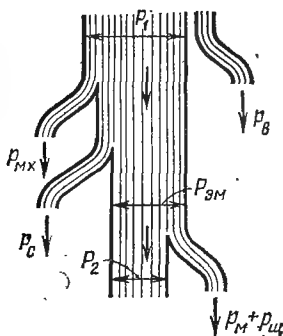


Рис. 6.1. Энергетическая схема генератора постоянного тока независимого возбуждения

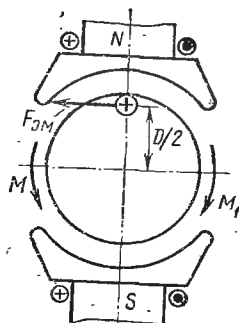


Рис. 6.2. Схема работы генератора

Так как $P_2 = UI_{\text{я}}$; $P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}}$ и $P_{\text{м}} + P_{\text{щ}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$, где $R_{\text{я}}$ — сопротивление всех обмоток в цепи якоря и щеточного контакта, то $P_2 = UI_{\text{я}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$. После сокращения обеих частей этого равенства на $I_{\text{я}}$ получаем уравнение э.д.с. генератора:

$$E_{\text{я}} = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (6.3)$$

Уравнение моментов генератора. Предположим, что первичный двигатель развивает на валу генератора момент M_1 , приводящий генератор во вращение по часовой стрелке с некоторой постоянной частотой n (рис. 6.2). Если генератор возбужден, то в проводнике, находящемся под северным полюсом, наводится э.д.с., направленная за плоскость чертежа. Если генератор работает в режиме х.х., то для вращения якоря нужен небольшой момент M_0 . Этот момент затрачивается на преодоление трения в подшипниках; щеток о коллектор, вращающихся частей о воздух, а также на покрытие потерь в стали сердечника якоря. При работе нагруженного генератора в проводах обмотки якоря появляется ток $i_{\text{я}} = I_{\text{я}} / (2a)$, в результате

взаимодействия которого с основным магнитным полем машины на каждый проводник обмотки якоря действует сила

$$F_{\text{эм}} = B_{\text{ср}} l i_{\text{я}}, \quad (6.4)$$

где $B_{\text{ср}}$ — среднее значение магнитной индукции в зазоре; l — длина якоря.

Определив по правилу «левой руки» направление этих сил, убеждаемся, что создаваемый ими электромагнитный момент направлен против вращающего момента первичного двигателя M_1 . Величина электромагнитного момента (Н·м).

$$M = F_{\text{эм}} 0,5DN = B_{\text{ср}} l i_{\text{я}} 0,5DN,$$

где N — число активных проводников обмотки якоря.

Имея в виду, что $i_{\text{я}} = I_{\text{я}} / (2a)$; $\pi D = 2p\tau$ и магнитный поток возбуждения $\Phi = B_{\text{ср}} l \tau$, получим $M = B_{\text{ср}} l \frac{I_{\text{я}}}{2a} \frac{2p\tau}{2\pi}$; $N = pNI_{\text{я}}\Phi / (2\pi a)$, или

$$M = c_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi, \quad (6.5)$$

где $c_{\text{м}} = pN / (2\pi a)$ — величина, постоянная для данной машины.

При неизменной частоте вращения ($n = \text{const}$) вращающий момент первичного двигателя M_1 уравнивается суммой противодействующих моментов: моментом х.х. M_0 и электромагнитным моментом M , т. е. $M_1 = M_0 + M$. Полученное выражение представляет собой уравнение моментов для генератора при $n = \text{const}$.

§ 6.2. Генератор независимого возбуждения

Независимое возбуждение применяют достаточно широко: в генераторах низкого (4—24 В) и высокого напряжений (свыше 600 В), в машинах большой мощности, где требуется широкое регулирование напряжения (на судах в рулевых электроприводах, в гребных электрических установках постоянного тока в качестве главных генераторов и возбuditелей и в других устройствах).

Характеристика холостого хода. $U = f(I_{\text{в}})$ при $I_{\text{я}} = 0$ и $n = \text{const}$. Схема для снятия характеристики х.х. представлена на рис. 6.3. Отключив рубильником нагрузку, устанавливают номинальную частоту вращения. Затем постепенно увеличивают ток в обмотке возбуждения $I_{\text{в}}$ от нуля до $+I_{\text{в.макс}} = 0 \text{ а}$ (рис. 6.4), при котором напряжение U_0 растет по кривой 1 до значения $+U_{\text{омакс}} = (1,1 \div 1,25) U_{\text{ном}}$. Так как $I_{\text{я}} = 0$, то $U = E = c_{\text{е}} n \Phi = c_{\text{е}} \Phi$, где $c_{\text{е}}$ — постоянный коэффициент.

Таким образом, характеристика х.х. $U = c_{\text{е}} \Phi = f(I_{\text{в}})$ представляет собой в ином масштабе характеристику намагничивания машины. При уменьшении тока возбуждения до $I_{\text{в}} = 0$, изменяя его направления, можно получить кривую 2, называемую *нисходящей ветвью* характеристики. Она располагается в первом квадранте выше кривой 1 вследствие увеличения остаточного магнитного потока. Если же повторить опыт изменения тока возбуждения в обратном на-

правлении, то получим кривую 3, называемую *восходящей ветвью* характеристики х.х. Нисходящая и восходящая ветви образуют петлю гистерезиса, определяющую свойства стали полюсов и ярма. Проведя между кривыми 2 и 3 среднюю линию 4, получим расчетную характеристику х.х. Прямолинейная часть характеристики х.х. соответствует ненасыщенному состоянию магнитной системы. При значительных токах возбуждения сталь машины насыщается и характеристика приобретает криволинейный характер. Точка, соответствующая номинальному напряжению, обычно лежит на «коле-

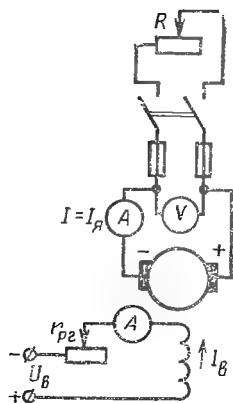


Рис. 6.3. Схема генератора независимого возбуждения

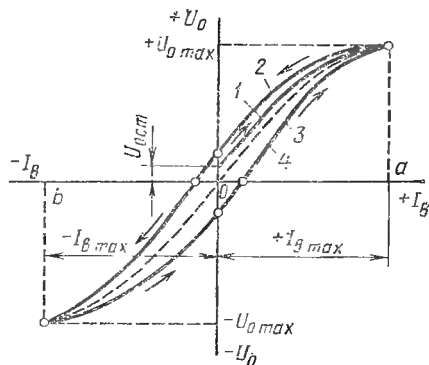


Рис. 6.4. Характеристика х.х. генератора независимого возбуждения

не» кривой, так как работа машины на прямолинейном участке характеристики приводит к значительным колебаниям напряжения, а работа в области насыщения требует большого тока возбуждения и ограничивает пределы регулировки напряжения.

Нагрузочная характеристика. Для снятия нагрузочной характеристики $U=f(I_B)$ при $I_A=\text{const}$ и $n=\text{const}$ возбуждают генератор и устанавливают требуемый ток нагрузки I_A при помощи нагрузочного реостата R . Затем постепенно уменьшают ток возбуждения I_B , но при этом также уменьшают величину сопротивления нагрузки таким образом, чтобы при каждом отсчете параметров I_B и U ток нагрузки оставался неизменным. При нагрузке напряжение генератора снижается вследствие падения напряжения в цепи якоря $I_A R_A$ и размагничивающего действия реакции якоря. Поэтому нагрузочная характеристика проходит ниже характеристики х.х., причем тем ниже, чем больше нагрузочный ток I_A (рис. 6.5). Чтобы учесть влияние этих двух факторов на снижение напряжения генератора при нагрузке, рассмотрим построение характеристического треугольника abc по характеристикам х.х. и нагрузочной при $I_A=I_{\text{ном}}$. Пусть точка c нагрузочной характеристики соответствует номинальному напряжению генератора $U_{\text{ном}}$ при номинальном токе возбуждения $I_{B\text{ном}}$ и номинальном токе нагрузки $I_{\text{ном}}$. Если отключить нагрузку,

постепенное изменение напряжения равно разности напряжений при х.х. и напряжения при номинальной нагрузке в долях номинального напряжения: $\Delta U = (U_0 - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}} = \Delta U_{\text{ном}} / U_{\text{ном}}$. При к.з. генератора напряжение при его зажимах падает до нуля ($U=0$), а ток к.з. $I_{\text{к.з}}$ во много раз превосходит номинальный. Поэтому к.з. генератора независимого возбуждения — чрезвычайно опасно. Внешнюю характеристику можно построить также с помощью характеристики х.х. и характеристического треугольника. Для этого проведем (рис. 6.6, б) вертикальную прямую dk , соответствующую заданному току возбуждения $I_{\text{в.ном}} = \text{const}$. Тогда $dk = 0z_0$ соответствует U_0 при $I_{\text{я}} = 0$ и определяет начальную точку внешней характеристики. Рас-

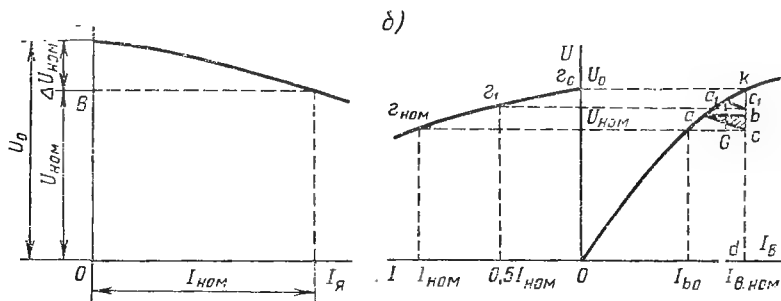


Рис. 6.6. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения (а) и ее построение (б)

положен характеристический треугольник abc для тока $I_{\text{я}} = I_{\text{ном}}$ таким образом, чтобы его вершина a лежала на характеристике, а катеты ab и bc были параллельны — первый оси абсцисс, а второй — оси ординат. Этим определяется положение точки c , соответствующей напряжению $U = U_{\text{ном}}$. Чтобы получить промежуточные точки внешней характеристики, например точку для тока $I = 0,5I_{\text{ном}}$, нужно повторить построение, уменьшив каждую из сторон треугольника abc в два раза. Но вместо этого можно разделить гипотенузу ac пополам в точке G и перенести отрезок cG параллельно гипотенузе ac в положение a_1c_1 . После этого из точки c_1 проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с ординатой $0,5I_{\text{ном}}$; получаем точку z_1 , а затем по точкам $z_0, z_1, z_{\text{ном}}$ строим внешнюю характеристику.

Регулировочная характеристика. Если регулировать ток возбуждения генератора так, чтобы при увеличении тока нагрузки напряжение генератора оставалось постоянным и равным номинальному, то соответствующая кривая зависимости тока возбуждения $I_{\text{в}}$ от нагрузочного тока $I_{\text{я}}$ будет представлять собой регулировочную характеристику машины, $I_{\text{в}} = f(I_{\text{я}})$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Для снятия регулировочной характеристики пользуются схемой, показанной на рис. 6.3. При разомкнутом рубильнике устанавливают номинальное напряжение. Затем включают нагрузку и постепенно увеличивают ток до $I_{\text{ном}}$. Для поддержания неизменным напряжения генератора

$I_B R_B$; 3) э.д.с. самоиндукции $-L_B(dI_B/dt)$, где L_B — индуктивность цепи возбуждения. Таким образом,

$$U_B - L_B \frac{dI_B}{dt} = I_B R_B \text{ или } U_B = I_B R_B + L_B \frac{dI_B}{dt}. \quad (6.7)$$

Обычно процесс самовозбуждения происходит при х.х. и $R_B = \text{const}$. Тогда зависимость $U_B = f(I_B)$ изображается кривой х.х. (кривая 1 на рис. 6.9), зависимость $I_B R_B = f(I_B)$ определяется прямой 2, а $L_B(dI_B/dt)$ — отрезками ординат между кривой 1 и прямой 2.

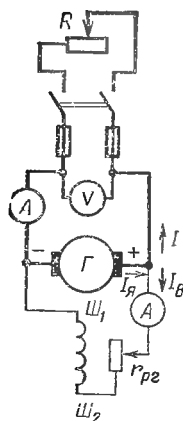


Рис. 6.8. Схема генератора параллельного возбуждения

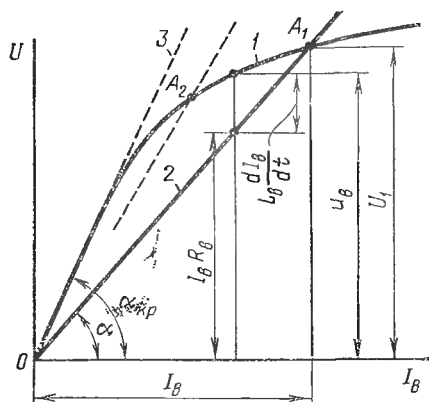


Рис. 6.9. Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения

В точке A_1 пересечения кривой 1 и прямой 2 э.д.с. самоиндукции $L_B(dI_B/dt) = 0$, а так как L_B — конечная величина, то $dI_B/dt = 0$ и, следовательно, $I_B = \text{const}$. Таким образом, в точке A_1 процесс самовозбуждения прекращается. Для получения этой точки проводят прямую под углом α , тангенс которого в определенном масштабе пропорционален величине суммарного сопротивления цепи возбуждения: $\text{tg} \alpha = U/I_B = R_B$, где R_B — сопротивление обмотки возбуждения и регулировочного реостата. Если мы будем увеличивать сопротивление R_B , т. е. угол α , то точка A_1 будет перемещаться по характеристике х.х. в направлении к 0. Если R_B увеличить до такой степени, что прямая 2 будет касательной к начальной части характеристики х.х. (прямая 3), то в этих условиях генератор не возбуждается. Сопротивление цепи возбуждения, при котором прекращается самовозбуждение генератора, называют *критическим сопротивлением* $R_{B\text{-кр}}$, и угол α , соответствующий этому сопротивлению, — *критическим углом*. Следовательно, самовозбуждение генератора параллельного возбуждения возможно при соблюдении следующих условий:

а) магнитная система машины должна обладать остаточным магнетизмом;

б) магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, должен совпадать по направлению с потоком остаточного магнетизма;

в) сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического: $R_{\text{в}} < R_{\text{в.кр}}$;

г) сопротивление нагрузки не должно быть очень малым.

Характеристика холостого хода. Так как генератор параллельного возбуждения самовозбуждается только в одном направлении, то и характеристика холостого хода $U_0 = f(I_{\text{в}})$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$ может быть снята тоже только в одном направлении (рис. 6.10).

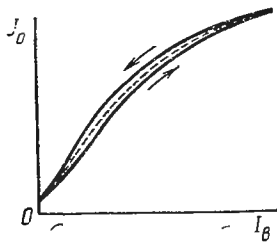


Рис. 6.10. Характеристика х. х. генератора параллельного возбуждения

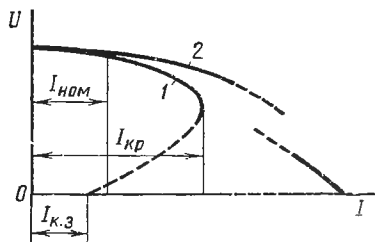


Рис. 6.11. Внешние характеристики генераторов параллельного 1 и независимого 2 возбуждения

Так как падением напряжения в якоре от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ можно пренебречь, то характеристики х.х. и нагрузочная характеристика практически совпадают с аналогичными характеристиками генератора независимого возбуждения.

Внешняя характеристика. Эти характеристики имеют вид: $U = f(I)$ при $R_{\text{в}} = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Если у генератора независимого возбуждения ток возбуждения оставался неизменным, то у генератора параллельного возбуждения он меняется с изменением нагрузки. При увеличении нагрузки напряжение на зажимах генератора под влиянием реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря уменьшается. Снижение напряжения вызывает уменьшение тока возбуждения $I_{\text{в}} = U/R_{\text{в}}$. В свою очередь, уменьшение $I_{\text{в}}$ вызывает ослабление основного магнитного потока, а следовательно, уменьшение э.д.с. и напряжения на зажимах генератора. С понижением напряжения происходит дальнейшее уменьшение $I_{\text{в}}$. При этом магнитная система генератора постепенно размагничивается. В генераторе с параллельным возбуждением ток нагрузки увеличивается лишь до определенного критического значения $I_{\text{кр}}$, превышающего номинальное не более чем в 2—2,5 раза. Величина тока нагрузки зависит от двух факторов: величины напряжения генератора и сопротивления нагрузки. При увеличении нагрузки уменьшается напряжение на зажимах генератора (рис. 6.11). В начале, когда магнитная система насыщена, размагничивание идет медленно и напряжение U изменяется незначительно, вследствие чего ток в цепи якоря увеличивается. Однако при дальнейшем увеличении тока степень насыщения магнитной системы резко уменьшается, и напряжение начи-

наст быстро падать. Преобладающим будет уже не уменьшение сопротивления цепи, а понижение напряжения. Поэтому ток, достигнув критического значения, начнет уменьшаться. При к.з. $I_B=0$, так как $U=0$. Величина $I_{к-з}$ будет определяться только величиной э.д.с. остаточной индукции: $I_{к-з}=E_{ост}/R_{я}$. Таким образом, к.з., вызванное постепенным уменьшением сопротивления нагрузки, не опасно для генератора параллельного возбуждения. Но при внезапном коротком замыкании магнитная система генератора не успевает сразу размагнититься, и ток $I_{к-з}$ достигает опасных для машины значений. При таком резком возрастании тока на валу генератора возникает значительный тормозящий момент, а на коллекторе появляется сильное искрение, переходящее в круговой огонь.

Регулировочная характеристика. Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения $I_B=f(I)$ при $U=\text{const}$ и $n=\text{const}$ имеет такой же вид, как и у генератора независимого возбуждения.

§ 6.4. Генератор последовательного возбуждения

В генераторе последовательного возбуждения ток возбуждения $I_B=I_{я}$ (рис. 6.12, а), а поэтому свойства этого генератора определяются лишь внешней характеристикой (рис. 6.12, б). Все другие характеристики генератора могут быть сняты только при включении его на независимое возбуждение.

Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения показывает, что с увеличением тока нагрузки от нуля до номинального напряжения на зажимах генератора в начале, когда магнитная цепь еще не насыщена, растет почти прямо пропорционально току нагрузки. Затем рост напряжения постепенно уменьшается и, наконец, прекращается.

Объясняется это тем, что $I_{я}$ одновременно является и током возбуждения I_B , и с ростом нагрузки происходит насыщение стали. Однако одновременно с ростом тока якоря увеличивается как размагничивающее влияние реакции якоря, так и падение напряжения в сопротивлениях цепи якоря и обмотки возбуждения, вызывающее уменьшение напряжения на зажимах генератора. При большом насыщении стали магнитной цепи машины рост магнитного потока и э. д. с. практически прекращаются. В то же время падение на-

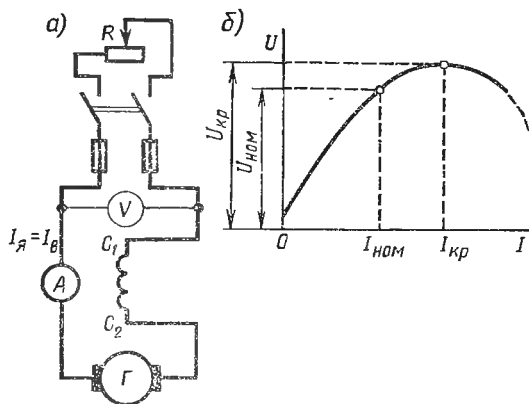


Рис. 6.12. Схема (а) и внешняя характеристика (б) генератора последовательного возбуждения

пряжения и реакция якоря будут продолжать возрастать. При к. з. напряжение генератора будет равно нулю, а ток к. з. намного превышать номинальный ток машины. Генератор последовательного возбуждения практического применения не имеет, так как не удовлетворяет требованиям большинства потребителей в отношении постоянства напряжения.

§ 6.5. Генератор смешанного возбуждения

Так как генератор смешанного возбуждения имеет параллельную и последовательную обмотки возбуждения (рис. 6.13, а), то он совмещает в себе свойства генераторов обоих типов. Поток воз-

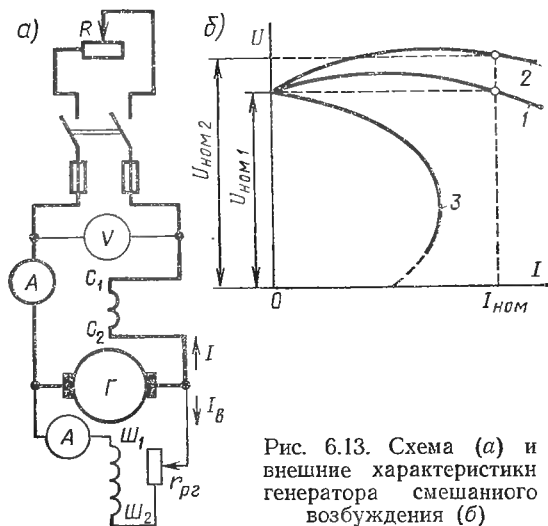


Рис. 6.13. Схема (а) и внешние характеристики генератора смешанного возбуждения (б)

буждения создается в основном параллельной обмоткой, а последовательную обмотку включают согласно с параллельной (чтобы н. с. обмоток складывались). Свойства генератора зависят от соотношения н. с. этих обмоток. При подключении нагрузки в цепи якоря появляется ток, и возбуждение генератора осуществляется одновременно действием н. с. параллельной и последовательной обмоток.

Форма внешней характеристики генератора смешанного возбуждения (рис. 6.13, б) зависит от соотношения витков обмоток возбуждения. При соответствующем подборе витков обмотки последовательного возбуждения ее н. с. может компенсировать падение напряжения генератора и действие реакции якоря, а напряжение на зажимах генератора при изменении нагрузки остается почти неизменным (кривая 1). Чтобы иметь возможность поддерживать постоянное напряжение на зажимах потребителя (в конце линии), нужно скомпенсировать падение напряжения в проводах линии. В этом случае усиливают последовательную обмотку возбуждения так, чтобы внешняя характеристика имела вид кривой 2. При

встречном включении обмоток возбуждения генератора с ростом тока нагрузки резко уменьшается (кривая 3), что объясняется размагничивающим действием последовательной обмотки возбуждения, н.с. которой направлена встречно н.с. параллельной обмотки. Встречное включение обмоток применяется в генераторах специального назначения, например в сварочных генераторах, где требуется получить крутопадающую внешнюю характеристику для ограничения токов к. з. Нагрузочные характеристики генератора смешанного возбуждения $U=f(I_B)$ при $I=\text{const}$ и $n=\text{const}$ имеют тот же вид, что и соответствующие характеристики генератора параллельного возбуждения, но при достаточно сильной последовательной обмотке они могут расположиться выше характеристики х. х. Постоянство напряжения на зажимах генератора обычно поддерживают регулированием тока в обмотке параллельного возбуждения. Вид регулировочной характеристики зависит от соотношения н. с. обмотки последовательного возбуждения, размагничивающего действия реакции и падения напряжения в цепи якоря. На рис. 6.14 показаны регулировочные характеристики при нормальном возбуждении (кривая 1) и при перевозбуждении (кривая 2).

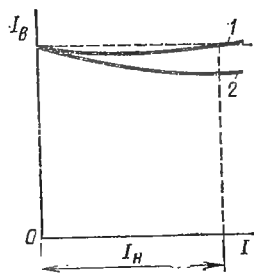


Рис. 6.14. Регулировочные характеристики генератора смешанного возбуждения

§ 6.6. Параллельная работа генераторов постоянного тока

На электростанциях постоянного тока обычно устанавливают несколько генераторов, включенных параллельно на общие шины. Суммарная мощность этих генераторов должна соответствовать мощности питаемых ими потребителей. Кроме того, на случай аварии одного из работающих генераторов или остановки его на профилактический ремонт необходим резервный генератор. Установка нескольких генераторов вместо одного суммарной мощности обеспечивает более эффективное использование агрегатов. Так, при уменьшении нагрузки часть генераторов может быть отключена, чтобы остальные работали с полной нагрузкой, а следовательно, с более высоким к.п.д. В параллельной работе чаще применяют генераторы параллельного возбуждения. При включении их на параллельную работу необходимо выполнять ряд условий и обеспечивать возможность перевода нагрузки с одного генератора на другой.

Включение генераторов на параллельную работу. Из двух генераторов (рис. 6.15) один G_I включен в сеть, т. е. рубильник PI замкнут. Для присоединения генератора G_{II} к этой же сети необходимо создать такие условия, чтобы ток в цепи якоря второго генератора G_{II} был минимальным. Для этого сумма э.д.с. в замкнутом контуре, образованном цепями якорей генераторов и участком сети между

ними, должны быть равны нулю, т. е. $E_{ГI} + E_{ГII} = 0$. Из этой формулы $E_{ГI} = -E_{ГII}$, т. е. э.д.с. генераторов должны быть равны и направлены встречно. Пользуясь специальным переключателем, можно поочередно вольтметром V измерить напряжение генератора и сети. При правильной полярности генераторов стрелка вольтметра отклоняется в одну сторону. Если стрелка отклоняется в разные стороны, то нужно изменить полярность включаемого генератора. Регулируют э.д.с. генератора Γ_{II} реостатом, включенным в цепь его возбуждения. Обычно генератор Γ_{II} включают в сеть рубильником $P2$, когда генератор Γ_I уже нагружен. В этом случае $U_{\text{сети}} = E_{ГI} - I_{ГI} R_{ГI}$

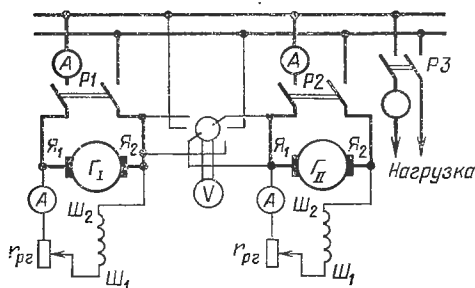


Рис. 6.15. Схема генераторов параллельного возбуждения при параллельной работе

и для включения генератора Γ_{II} необходимо выполнить условие правильной полярности и установить реостат в цепи возбуждения такой ток, чтобы э. д. с. генератора была равна напряжению сети: $E_{ГII} = U_{\text{сети}}$.

Распределение и перевод нагрузки. При параллельной работе генераторов напряжения на их зажимах должны быть одинаковы, так как они включены на общую сеть с напряжением $U_{\text{сети}}$.

Из уравнения равновесия э. д. с. генератора постоянного тока имеем:

$$U_{\text{сети}} = E_{ГI} - I_{ГI} R_{ГI}; \quad U_{\text{сети}} = E_{ГII} - I_{ГII} R_{ГII},$$

откуда

$$I_{ГI} = (E_{ГI} - U_{\text{сети}}) / R_{ГI}; \quad I_{ГII} = (E_{ГII} - U_{\text{сети}}) / R_{ГII}. \quad (6.8)$$

После включения Γ_{II} в сеть требуется перевести на него нагрузку с Γ_I . Для этого необходимо повысить его э.д.с. $E_{ГII}$ увеличением тока возбуждения. При этом в цепи якоря Γ_{II} установится ток $I_{ГII}$, а в цепи якоря Γ_I ток $I_{ГI}$ уменьшится и в результате этого напряжение сети увеличится, что может нарушить нормальную работу приемников электроэнергии. Для того чтобы при переводе нагрузки напряжение сети оставалось неизменным, необходимо одновременно увеличивать ток возбуждения на Γ_{II} и уменьшать ток возбуждения на Γ_I . Таким образом, изменением тока возбуждения работающих параллельно генераторов можно переводить нагрузки с одного генератора на другой и поддерживать постоянным напряжение сети. Перед отключением Γ_I необходимо перевести его нагрузку на Γ_{II} , т. е. выполнить условие $I_{ГI} = 0$ за счет уменьшения тока возбуждения Γ_I и одновременного увеличения тока возбуждения на Γ_{II} . При большом изменении э.д.с. $E_{ГI}$ разность $E_{ГI} - U_{\text{сети}}$ может стать отрицательной и ток $I_{ГI}$ изменит направление относительно э.д.с. $E_{ГI}$, т. е. Γ_I станет работать двигателем, потребляя энергию от Γ_{II} . Наличие двух двигателей на одном валу может привести к аварии,

поэтому в схемах генераторов предусматривается защита, отключающая генератор при изменении направления тока якоря.

Если генераторы работают параллельно без регулирования токов возбуждения, то распределение нагрузок между ними зависит от наклона их внешних характеристик.

На рис. 6.16 приведены внешние характеристики генераторов Γ_I и Γ_{II} . Если генераторы включены на параллельную работу при х.х., то эти характеристики исходят из одной точки U_0 на оси ординат. Если затем подключить к генераторам нагрузку, то напряжение понизится до некоторого значения $U_{сети}$, общего для обоих генераторов. При этом Γ_I , имеющий характеристику с большим наклоном, чем Γ_{II} , будет нагружаться меньшим током $I_{\Gamma I}$. Поэтому желатель-

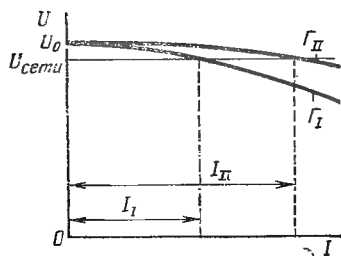


Рис. 6.16. Распределение тока между генераторами

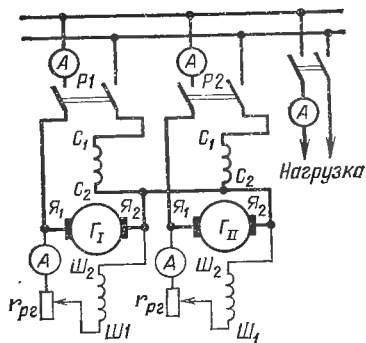


Рис. 6.17. Схема генераторов смешанного возбуждения при параллельной работе

но, чтобы генераторы одинаковой мощности, включаемые на параллельную работу, имели совпадающие внешние характеристики, генераторы различной мощности — одинаковые изменения напряжения при номинальной нагрузке.

Параллельная работа генераторов смешанного возбуждения. Схема генераторов смешанного возбуждения при параллельной работе показана на рис. 6.17. Ее отличительная особенность состоит в том, что точки $c2c2$, в которых последовательные обмотки приключены к одноименным зажимам якоря, соединены между собой уравнительным проводом. Если этот провод отсутствует, то устойчивая параллельная работа невозможна. Допустим, ток $I_{\Gamma I}$ первого генератора по какой-либо причине (например, вследствие увеличения частоты вращения) несколько увеличился, тогда магнитное поле последовательной обмотки возбуждения этого генератора усилится, его э.д.с. $E_{\Gamma I}$ возрастет, что вызовет дальнейшее увеличение тока $I_{\Gamma I}$ и т.д. Одновременно ток $I_{\Gamma II}$ и э.д.с. $E_{\Gamma II}$ второго генератора будут беспрерывно уменьшаться. В результате один генератор будет нагружаться, а второй разгружаться и параллельная работа их становится неустойчивой. При наличии уравнительного провода парал-

тельная работа будет протекать нормально, так как случайное приращение тока якоря одного генератора распределится между последовательными обмотками возбуждения обоих генераторов и вызовет увеличение э.д.с. генераторов. Нагрузка с одного генератора на другой переводится так же, как в генераторах параллельного возбуждения.

Глава 7

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 7.1. Общие сведения о двигателях постоянного тока

Двигатели постоянного тока находят широкое применение в промышленных, транспортных, крановых и других установках, где требуется широкое плавное регулирование частоты вращения. Одна

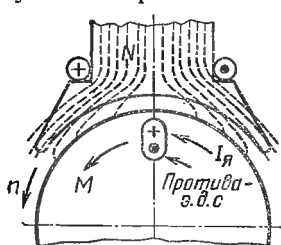


Рис. 7.1. Направление момента и противо-э. д. с. обмотки якоря двигателя

и та же электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Это свойство электрических машин называют *обратимостью*. Предположим, что к двигателю подведено напряжение $U_{\text{сети}} = \text{const}$. При заданной на рис. 7.1 полярности полюсов и направлении тока $I_{\text{я}}$ в якоре (обмотка якоря показана только одним проводником) на валу двигателя создается вращающий электромагнитный момент M , направленный против вращения часовой стрелки. Под действием этого момента двигатель вращается в направ-

лении момента с постоянной частотой n . Применяя правила правой руки, находим, что в проводнике (обмотке) якоря наводится э. д. с. $E_{\text{я}}$, направленная встречно относительно тока якоря, и поэтому ее называют противо-э. д. с. якоря и рассматривают как электромагнитное противодействие двигателя относительно напряжения сети $U_{\text{сети}}$. Для двигателя, работающего с постоянной частотой вращения, можно составить уравнение э. д. с.

$$U_{\text{сети}} = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (7.1)$$

где $E_{\text{я}}$ и $I_{\text{я}}$ — э.д.с и ток, соответствующие установившемуся режиму работы; $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ — падение напряжения в сопротивлениях цепи якоря двигателя.

Уравнение моментов двигателя. Электромагнитный момент двигателя

$$M = \frac{1}{\pi} N I_{\text{я}} p \Phi / (2a) = c_m I_{\text{я}} \Phi \quad (7.2)$$

создается в результате взаимодействия основного магнитного поля Φ и тока в обмотке якоря $I_{\text{я}}$ и расходуется на преодоление тормозящих моментов:

1) момента х.х. M_0 ;

2) полезного момента M_2 ;
 3) динамического момента M_j . Момент х.х. M_0 существует при любом режиме работы двигателя и определяется трением в подшипниках, трением щеток о коллектор, вентиляционными потерями и потерями в стали. Полезный момент M_2 определяется свойствами рабочей машины и характером производственного процесса. Динамический момент возникает при всяком изменении частоты вращения двигателя

$$M_j = \pm J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (7.3)$$

где J — момент инерции всех вращающихся частей; Ω — угловая скорость вращения якоря.

Если частота вращения двигателя увеличивается, то момент E_j положителен и, складываясь с моментами M_0 и M_2 , увеличивает тормозной момент на валу двигателя. При уменьшении n момент M_j отрицателен и уменьшает общий тормозной момент. Зависимость между вращающим и тормозным моментами двигателя на его валу определяется законом равновесия моментов: в любых условиях работы двигателя эти моменты находятся во взаимном равновесии, т. е. равны друг другу по величине, но направлены в противоположные стороны. При $n = \text{const}$ момент $M_j = 0$ и тогда

$$M = M_0 + M_2 = M_{\text{ст}}, \quad (7.4)$$

где $M_{\text{ст}}$ — статический момент сопротивления на валу двигателя.

Следовательно, двигатель работает устойчиво и вращается с постоянной частотой, если развиваемый и вращающий момент равен противодействующему моменту $M = M_{\text{ст}}$. Точкой установившегося режима работы двигателя является точка пересечения механических характеристик электродвигателя $M = f(n)$ и исполнительного механизма $M_{\text{ст}} = f(n)$.

Если двигатель и приводимый им во вращение исполнительный механизм имеют механические характеристики $M = f(n)$ и $M_{\text{ст}} = f(n)$ (рис. 7.2, а), то при случайном увеличении частоты вращения от n до n' равенство моментов нарушится. Момент, развиваемый двигателем, уменьшится и станет меньше тормозного ($M' < M_{\text{ст}}$). Поэтому двигатель будет затормаживаться до значения n , при котором $M = M_{\text{ст}}$. Наоборот, при случайном уменьшении частоты n до значения n'' вращающий момент двигателя M'' становится больше противодействующего момента $M''_{\text{ст}}$, и якорь двигателя получает ускорение, возвращающее его к исходной частоте n . Таким образом, в рассматриваемом случае работа двигателя устойчива, так как $(dM/dn) < (dM_{\text{ст}}/dn)$. Если же механические характеристики $M = f(n)$ и $M_{\text{ст}} = f(n)$ имеют вид, показанный на рис. 7.2, б, работа электродвигателя становится неустойчивой. Действительно, при случайном изменении частоты вращения от n до n' избыточный вращающий момент двигателя M' вызывает дальнейшее увеличение частоты вращения. Если же произойдет изменение частоты вращения от n до n'' , то избыточный противодействующий мо-

мент вызывает дальнейшее уменьшение частоты вращения, следовательно, работа двигателя будет неустойчивой, так как $(dM/dn) > > (dM_{ст}/dn)$.

Энергетическая диаграмма двигателя. На рис. 7.3 изображена энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения, работающего в установившемся режиме, т. е. при $n = \text{const}$. К двигателю из сети подводится мощность $P_1 = U_c I$, которая покрывает потери в цепи возбуждения $I_a^2 R_a$ и электрические потери в цепи якоря $I_a^2 R_a$, а оставшаяся ее часть составляет электромагнитную

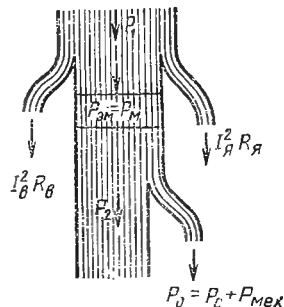
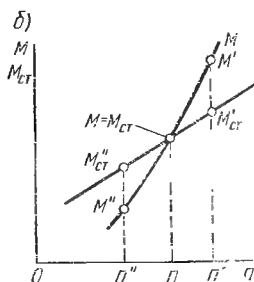
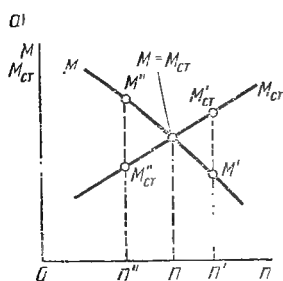


Рис. 7.2. К понятию об устойчивой работе двигателя

Рис. 7.3. Энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения

мощность якоря $P_{эм} = E_a I_a$, преобразующуюся в полную механическую мощность P_m двигателя. Полезная механическая мощность на валу двигателя P_2 меньше полной механической мощности P_m на величину мощности P_0 , необходимой для покрытия потерь в стали P_c и механических потерь $P_{мех}$, т. е. $P_2 = P_m - (P_c + P_{мех})$.

§ 7.2. Классификация и характеристики двигателей постоянного тока

В зависимости от способа включения обмотки возбуждения и обмотки якоря различают следующие типы двигателей постоянного тока:

- 1) параллельного возбуждения;
- 2) последовательного возбуждения;
- 3) смешанного возбуждения, в которых имеются две обмотки возбуждения: параллельная и последовательная. Двигатели постоянного тока оцениваются по совокупности следующих видов характеристик: пусковых, рабочих, регулировочных и механических.

Пусковые характеристики. Пусковые характеристики определяются следующими величинами:

- а) пусковым током $I_{пуск}$, характеризуемым отношением $I_{пуск}/I_{ном}$;

б) пусковым моментом $M_{\text{пуск}}$, характеризующимся отношением $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$;

в) плавностью пусковой операции;

г) временем пуска в ход $t_{\text{пуск}}$;

д) экономичностью операции, определяемой стоимостью пусковой аппаратуры. В начальный момент пуска двигателя его якорь неподвижен, противо-э.д.с. в обмотке якоря равна нулю и ток в якоре двигателя $I_{\text{я}} = U_c/R_{\text{я}}$. Сопротивление цепи якоря невелико, поэтому пусковой ток превышает номинальный в 20 и более раз. Резкий скачок тока при пуске создает на валу двигателя большой пусковой момент, который может вызвать механические разрушения как самого двигателя, так и исполнительного механизма, привести к резкому падению напряжения в сети и вызвать интенсивное искрение под щетками. Поэтому при пуске двигателя в ход для ограничения пускового тока применяют пусковые реостаты, включаемые последовательно в цепь якоря (рис. 7.4). По мере увеличения частоты вращения якоря противо-э. д. с. увеличивается, а ток якоря уменьшается, поэтому сопротивление реостата следует уменьшить так, чтобы в конце пуска оно было полностью выведено и чтобы пусковой ток превышал номинальный не более чем в два-три раза.

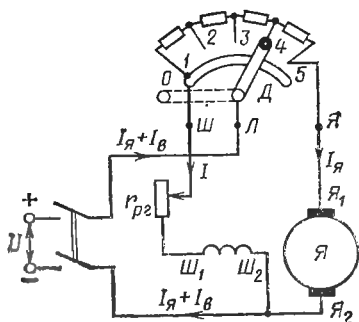


Рис. 7.4. Схема включения пускового реостата в цепь двигателя параллельного возбуждения

Рабочие характеристики. Под рабочими характеристиками понимают зависимости частоты вращения, вращающего момента и к.п.д. от полезной мощности на валу или от тока якоря n ; M и $\eta = f(P_2)$ или $f(I_{\text{я}})$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и номинальном токе возбуждения. Частоту вращения n определяют из уравнения э.д.с. $U_c = E_{\text{я}} + I_{\text{я}}R_{\text{я}} = c_e n \Phi + I_{\text{я}}R_{\text{я}}$, откуда $n = (U_c - I_{\text{я}}R_{\text{я}})/(c_e \Phi)$. Так как $U_c = \text{const}$, то форма частотной характеристики зависит только от падения напряжения $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ и изменения потока Φ .

Регулировочные характеристики. Эти характеристики определяют свойства двигателей при регулировании частоты вращения. К ним относятся:

а) пределы регулирования, определяемые отношением $n_{\text{макс}}/n_{\text{ном}}$;

б) экономичность регулирования (первоначальные затраты на оборудование и последующие эксплуатационные расходы);

в) характер регулирования — плавный или ступенчатый;

г) простота регулировочной аппаратуры и операций по регулированию частоты вращения. Двигатели постоянного тока обладают многообразными и гибкими регулировочными характеристиками и поэтому являются незаменимыми в установках с широко регулируемой частотой вращения.

Механические характеристики. Для электропривода производственных механизмов важное значение имеют механические характеристики, представляющие собой зависимость $n=f(M)$ при $U_c=\text{const}$ и постоянном сопротивлении в цепи якоря (при условии, что регулирование тока в цепи возбуждения двигателя не производится).

§ 7.3. Двигатель параллельного возбуждения

Для пуска в ход двигателей постоянного тока применяют двух-, трех- и четырехзажимные пусковые реостаты. На рис. 7.4 представлена схема включения трехзажимного пускового реостата для двигателя параллельного возбуждения. Реостат имеет шесть контактов: пять рабочих (1, 2, 3, 4, 5) и один холостой (нулевой 0); три зажима Л, Ш, Я, которые соответственно подключаются к линии, обмотке возбуждения и к якорю. Скользящий контакт реостата перемещается по неподвижным контактам и контактной дуге Д, благодаря которой обмотка

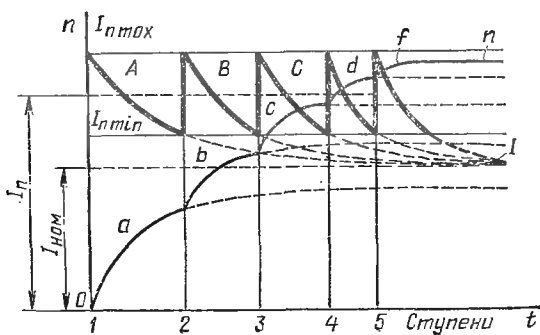


Рис. 7.5. Диаграмма процесса пуска двигателя в ход

возбуждения оказывается включенной на полное напряжение сети. Регулировочный реостат в цепи возбуждения r_{rp} следует вывести, так как в этом случае ток возбуждения I_b , магнитный поток Φ и вращающий момент двигателя достигают наибольшей величины, что облегчает пуск двигателя в ход. Пусковой реостат рассчитывают на кратковременный режим работы, когда количество его секций определяется условиями плавности пуска двигателя. Так как в первый момент пуска $n=0$, то и противо-э. д. с. $E_a=0$, и $I_{п.макс}=U_c/(R_a+\Sigma R_{п})$, где $R_{п}$ — сумма сопротивлений всех секций пускового реостата.

Пусковой реостат можно рассчитать так, чтобы при последовательном выключении его секций пусковой ток изменялся в пределах от $I_{п.макс}$ до $I_{п.мин}$. В этом случае $I_{п}=0,5(I_{п.макс}+I_{п.мин})$, на рис. 7.5 показана диаграмма реостатного пуска двигателя. После того как с увеличением частоты вращения пусковой ток уменьшится до значения $I_{п.мин}$, рукоятку реостата переводят на второй контакт, выводя тем самым сопротивление первой секции. Пусковой ток снова возрастает до $I_{п.макс}$, после чего частота вращения двигателя начнет возрастать по кривой b , а ток — уменьшаться по кривой B . В дальнейшем пусковой процесс идет в том же порядке до тех пор, пока

не будет выведен весь реостат, после чего двигатель будет работать в установившемся режиме при токе I и частоте вращения n . Остатки двигателя быстрым переводом рукоятки пускового реостата в нулевое положение и отключением рубильника P (рис. 7.4).

Рабочие характеристики двигателя. Они имеют вид $n; M; \eta = f(I_A)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $T_{\text{в}} = \text{const}$. Схема двигателя показана на рис. 7.6, а; реостат в цепи возбуждения $r_{\text{пр}}$ должен быть отрегулирован так, чтобы двигатель развивал номинальную мощность $P_{\text{ном}}$ при номинальных значениях напряжения $U_{\text{ном}}$ тока $I_{\text{ном}}$ и частоте вращения $n_{\text{ном}}$.

В этом положении реостат должен оставаться в неизменном положении. Рабочие характеристики показаны на рис. 7.6, б. Частота вращения якоря $n = (U - I_A R_A) / (c_e \Phi)$; так как, по условию, величины U и $I_{\text{в}}$ являются постоянными, то в этих условиях на частоту вращения двигателя влияют незначительно два факта: падение напряжения в якоре $I_A R_A$ и реакция якоря. При увеличении тока нагрузки I_A падение напряжения увеличивается, а частота вращения уменьшается. Одновременно реакция якоря размагничивает двигатель, т. е. приводит к уменьшению магнитного потока главных полюсов и, следовательно, стремится увеличить его частоту вращения.

Таким образом, указанные факты оказывают противоположные влияния на частоту вращения якоря и в зависимости от преобладания одного из этих факторов происходит уменьшение или увеличение частоты вращения при нагрузке двигателя. Чтобы работа двигателей параллельного возбуждения была устойчива даже при преобладании реакции якоря, необходимо ставить на главных полюсах стабилизирующую обмотку, которая соединяется последовательно с обмоткой якоря и включается согласно с параллельной обмоткой возбуждения. В этом случае при увеличении тока нагрузки размагничивающее действие реакции якоря компенсируется намагничивающим действием стабилизирующей обмотки. Таким образом, внешняя характеристика двигателя параллельного возбуждения $n = f(I_A)$ имеет вид почти прямой линии, слабо наклоненной к оси абсцисс. Изменение частоты вращения при увеличении нагрузки от нуля до номинальной составляет $2 \div 8\%$. Подобный вид внешней характеристики составляет одно из наиболее отличительных

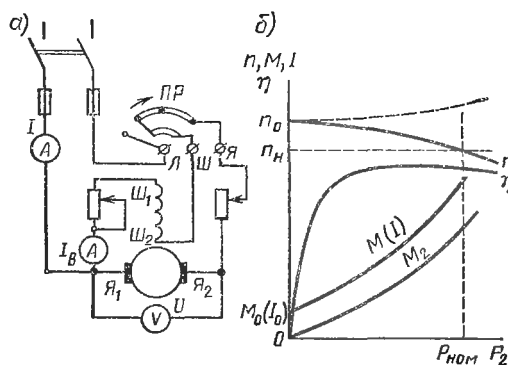


Рис. 7.6. Схема двигателя параллельного возбуждения (а) и его рабочие характеристики (б).

свойств двигателя параллельного возбуждения; такую характеристику называют жесткой. Зная характер зависимости $n \neq f(I_{\text{я}})$, нетрудно объяснить характеристику вращающего момента $M = f(I_{\text{я}})$. Согласно уравнению моментов, при установившемся режиме работы имеем: $M = c_M I_{\text{я}} \Phi = M_0 + M_2 = M_{\text{ст}}$. При холостом ходе $M = M_0 = c_M I_0 \Phi$. Если бы поток возбуждения оставался постоянным, то характеристика $M = f(I_{\text{я}})$ представляла бы прямую линию. В действительности же поток Φ при увеличении тока $I_{\text{я}}$ несколько уменьшается в результате размагничивающего действия поперечной реакции якоря, поэтому характеристика $M = f(I_{\text{я}})$ несколько отклоняется от прямой линии к оси тока. Характеристика полезного момента $M_2 = f(I_{\text{я}})$ должна идти ниже характеристики $M = f(I_{\text{я}})$ на величину момента холостого хода M_0 , который практически не зависит от нагрузки. На рис. 7.6, б представлена также кривая зависимости коэффициента полезного действия от нагрузки $\eta = f(I_{\text{я}})$. К. п. д. быстро увеличивается в пределах от $I = I_0$ до $I \approx 0,25 I_{\text{ном}}$, достигает максимума примерно при $I \approx 0,5 I_{\text{ном}}$, а затем в пределах изменения нагрузки от $I \approx 0,5 I_{\text{ном}}$ до $I = I_{\text{ном}}$ остается почти постоянным. Из графика к. п. д. видно, что для работы электродвигателя с высоким к. п. д. надо стремиться к его номинальной нагрузке. Обычно в двигателях малой мощности $\eta = 75 \div 85\%$, в двигателях средней и большей мощности $\eta = 85 \div 94\%$.

Регулировочные характеристики. Одним из основных достоинств двигателей постоянного тока является возможность плавного регулирования частоты вращения в широких пределах. В общем случае в цепь якоря двигателя может быть включен регулировочный реостат $R_{\text{пр}}$. Тогда из формулы $n = [U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{пр}})] / (c_e \Phi)$ следует, что частоту вращения двигателей постоянного тока можно регулировать:

- 1) изменением напряжения сети U ;
- 2) изменением падения напряжения в сопротивлениях цепи якоря $I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{пр}})$;
- 3) изменением потока возбуждения, а следовательно, изменением тока возбуждения $I_{\text{в}}$. Первый способ возможен только в специальных установках, допускающих регулирование напряжения сети U . Реостат $R_{\text{пр}}$ в цепи якоря должен быть подобран так, чтобы можно было регулировать частоту вращения в желаемых пределах. Предположим, что напряжение сети и ток возбуждения остаются постоянными, т. е. $U = \text{const}$ и $I_{\text{в}} = \text{const}$, кроме того, статический момент $M_{\text{ст}} = M_0 + M_2$ не зависит от частоты вращения двигателя. При выведенном реостате $R_{\text{пр}}$ установившийся режим работы двигателя характеризуется вращающим моментом M_2 , частотой вращения n_1 и током в цепи якоря I_{21} . Сразу же после введения регулировочного реостата $R_{\text{пр}}$ частота вращения и противо-э. д. с. остаются без изменения вследствие значительного момента инерции якоря, а ток в цепи якоря уменьшается до значения I_{21}' . Соответственно уменьшается и вращающий момент двигателя.

Превышение нагрузочного момента над вращающим моментом приводит к снижению частоты вращения якоря, уменьшению проти-

во-э. д. с. и увеличению тока в цепи якоря (рис. 7.7). Новые значения тока I_{22} и частота вращения n_2 устанавливаются при равенстве вращающего момента двигателя и нагрузочного момента приводимого им во вращение механизма. При постоянном токе возбуждения и нагрузочном моменте M_2 установившееся значение тока в цепи якоря $I_{22}=I_{21}$ и частота вращения якоря $n_2=n_1[U - I_{21}(R_{\text{я}} + R_{\text{р}})]/(U - I_{21}R_{\text{я}})$. Подведенная к двигателю мощность $P_1 = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}})$ в установившихся режимах сохраняется неизменной. Полезная мощность $P_2 = M_2\Omega = M_2 2\pi n_2/60$ уменьшается пропорцио-

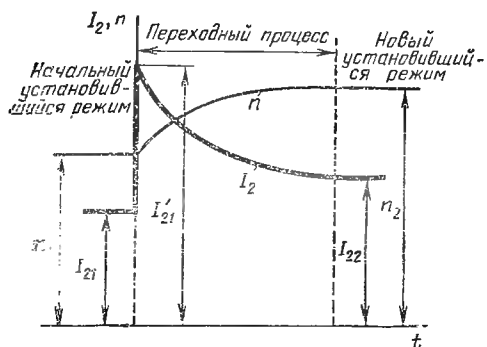


Рис. 7.7. Процесс регулирования частоты вращения реостатом в цепи якоря (а) и в цепи возбуждения (б)

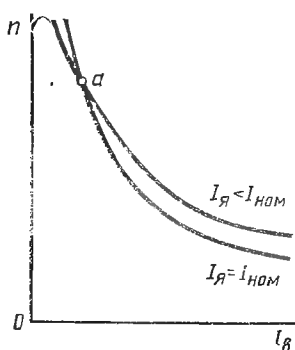


Рис. 7.8. Регулировочная характеристика двигателя

нально частоте вращения. Недостатки этого способа регулирования частоты вращения — малая экономичность и ухудшение условий охлаждения, поэтому его применяют, главным образом, для регулирования частоты вращения двигателей малой мощности. Если двигатель работает в установившемся режиме при неизменном напряжении на зажимах якоря и токе в обмотке возбуждения, то для необходимого вращающего момента M_2 по соответствующим рабочим характеристикам могут быть определены частота вращения n_1 , ток I_{21} в цепи якоря и вычислена противо-э. д. с. E_{21} . При уменьшении тока возбуждения до значения $I_{\text{в}2}$ уменьшается магнитный поток. Вследствие значительного момента инерции якоря частота вращения его сразу же после изменения тока возбуждения остается прежней, противо-э. д. с. уменьшается до значения E_{21}' пропорционально магнитному потоку, ток в цепи якоря увеличивается до значения $I_{21}' = (U - E_{21}')/R_{\text{я}}$. Так как падение напряжения в цепи якоря составляет небольшую часть напряжения сети, то относительное увеличение тока $(I_{21}' - I_{21})/I_{21} = (E_{21} - E_{21}')/(U - E_{21}) = (E_{21} - E_{21}')/(I_{\text{я}} R_{\text{я}})$ значительно превосходит относительное уменьшение магнитного потока. Это приводит к увеличению вращающего момента и к ускорению вращения якоря. Противо-э. д. с. в обмотке якоря увеличивается, ток уменьшается, пока не наступит равновесие между вращающим моментом двига-

теля и нагрузочным моментом приводимого им во вращение механизма при новых установившихся значениях тока I_{22} и частоте вращения n_2 (рис. 7.7). Подведенная к двигателю мощность $P_1 = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}})$ и полезная мощность $P_2 = M_2 2\pi n / 60$ увеличиваются в одинаковой мере, следовательно, к. п. д. двигателя при этом способе регулирования частоты вращения практически не изменяется. Зависимость частоты вращения n от величины тока возбуждения $I_{\text{в}}$ выражается регулировочной характеристикой двигателя $n = f(I_{\text{в}})$ при $I_{\text{я}} = \text{const}$ и $U = \text{const}$. На рис. 7.8 представлены две регулировочные характеристики двигателя, снятые при различных значениях тока якоря: при $I_{\text{я}} < I_{\text{ном}}$ и при $I_{\text{я}} = I_{\text{ном}}$. Из этих характеристик видно, что при малом значении тока возбуждения, а тем более при обрыве цепи возбуждения $I_{\text{в}} = 0$ частота вращения неограниченно возрастает, что приводит к «разносу» двигателя.

§ 7.4. Двигатель последовательного возбуждения

На рис. 7.9 приведена схема включения двигателя последовательного возбуждения. Пуск в ход этого двигателя осуществляется с помощью двухзажимного пускового реостата $РП$, так же как и двигателя параллельного возбуждения.

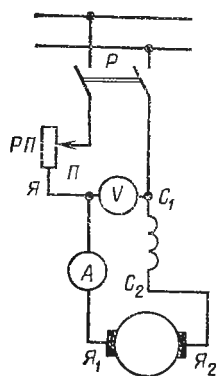


Рис. 7.9. Схема двигателя последовательного возбуждения

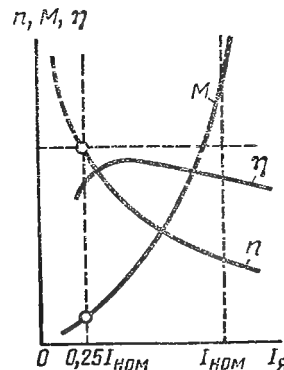


Рис. 7.10. Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

Рабочие характеристики двигателя. Они имеют вид $n; M$ и $\eta = f(I_{\text{я}})$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$. В двигателях последовательного возбуждения ток якоря одновременно является током возбуждения ($I_{\text{я}} = I_{\text{в}} = I$); поэтому магнитный поток Φ при различной нагрузке машины испытывает значительные изменения, и это составляет его характерную особенность. Из уравнения равновесия э. д. с. имеем ту же, что и для двигателя параллельного возбуждения, формулу

для частоты вращения: $n = (U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / (c_e \Phi)$. При работе двигателя последовательного возбуждения главное значение имеет изменение основного магнитного потока полюсов, если не учитывать падения напряжения $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ и реакцию якоря. При малых и средних нагрузках магнитную цепь двигателя можно считать ненасыщенной, и в этом случае $\Phi = k_{\text{ф}} I_{\text{я}}$, следовательно, $n = (U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / (c_e k_{\text{ф}} I_{\text{я}})$. Коэффициент пропорциональности $k_{\text{ф}}$ в значительном диапазоне нагрузок при $I_{\text{я}} < I_{\text{ном}}$ — практически постоянен и лишь при $I_{\text{я}} > (0,8 \div 0,9) I_{\text{ном}}$ вследствие насыщения магнитной цепи $k_{\text{ф}}$ начинает несколько уменьшаться.

На рис. 7.10 представлены рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения. Характеристика частоты вращения — мягкая, т. е. частота вращения резко меняется при изменениях нагрузки, и имеет гиперболический характер. Однако при значительном уменьшении нагрузки двигатель начинает развивать все большую частоту вращения или, как говорят, идет в «разнос», что может привести к разрушению машины. Поэтому двигатель последовательного возбуждения нужно ставить в такие условия работы, при которых ни пуск в ход без нагрузки, ни х. х. при работе были бы невозможны. Эти двигатели должны выдерживать без вредных последствий повышение частоты вращения на 20% сверх наибольшей, указанной на заводском щитке, но не более 50% сверх номинальной. Характеристика $M = f(I_{\text{я}})$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ двигателя последовательного возбуждения при слабом насыщении стали представляет собой параболу. Так как $\Phi = k_{\text{ф}} I_{\text{я}}$, а $M = c_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi$, то $M = c_{\text{м}}' I_{\text{я}}^2$. По мере увеличения тока $I_{\text{я}}$ двигатель насыщается, т. е. $\Phi = \text{const}$, не зависит от тока $I_{\text{я}}$ и характеристика момента спрямляется, приближаясь к прямой. В этих условиях момент изменяется почти пропорционально току, как у двигателя параллельного возбуждения: $M = c_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi$. Свойство двигателя последовательного возбуждения развивать момент, пропорциональный квадрату тока, имеет очень важное значение в тех случаях, когда нужен большой пусковой момент (краны, электровозы), и там, где необходима большая перегрузочная способность двигателя. Полезная мощность $P_2 = M_2 \Omega = M_2 2\pi n / 60$ с увеличением нагрузки увеличивается медленнее, чем вращающий момент, вследствие значительного уменьшения частоты вращения. Подведенная мощность $P_1 = UI$, пропорциональная току двигателя, также увеличивается медленнее вращающего момента. Характеристика к. п. д. имеет такой же вид, как и у двигателей параллельного возбуждения.

Регулировочная характеристика двигателя. Частота вращения двигателей последовательного возбуждения регулируется такими же способами, как и у двигателей параллельного возбуждения.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения. Этим способом можно регулировать частоту вращения ниже номинального значения. Рассматриваемый способ применяют в тяговых установках (кранах, метро, трамваях и др.), где устанавливают несколько двигателей, причем на малых частотах вращения их включают последовательно, а на больших — па-

раллельно, одновременно изменяя и включение регулировочного реостата $R_{рг}$, как показано на рис. 7.11, а.

Регулирование частоты вращения изменением магнитного потока возбуждения. При обычной схеме включения обмоток двигателя ток в обмотке возбуждения равен

току якоря. Если замкнуть рубильник $P1$ (рис. 7.11, б), то ток возбуждения уменьшится, увеличивая частоту. При повышении частоты вращения условия коммутации ухудшаются и ограничивают верхний предел частоты вращения якоря, который не превышает 1,4 номинальной. Для оценки этого способа регулирования частоты вращения введено понятие о коэффициенте ослабления поля $k_{о.п} = R_{ш.в}/(R_{в} + R_{ш.в})$, где $R_{ш.в}$ — шунтирующее сопротивление параллельной обмотки возбуждения. Аналогичное увеличение частоты вращения якоря можно получить, если

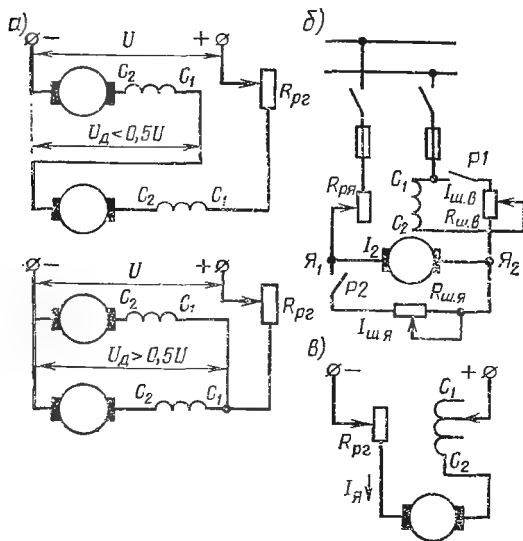


Рис. 7.11. Схемы регулирования частоты вращения двигателя последовательного возбуждения:

а — изменением схемы включения; б — изменением тока возбуждения; в — секционированием обмотки возбуждения

возбуждения секционированной, т. е. сделать отводы от некоторых витков обмотки возбуждения и производить изменения н. с. этой обмотки (рис. 7.11, в). Изменение сопротивления регулировочного реостата в цепи якоря также позволяет регулировать частоту вращения двигателя ($U_{д}$ — напряжение на двигателе).

§ 7.5. Двигатель смешанного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения имеет две обмотки возбуждения, одна $Ш$ из которых включается параллельно обмотке якоря, а вторая $С$ — последовательно (рис. 7.12). Соотношение н. с. обмоток может быть различным, но обычно одна из обмоток создает большую н. с., ее называют основной. Частота вращения двигателя $n = (U - I_{я}R_{я})/[c_e(\Phi_1 \pm \Phi_2)]$, где Φ_1, Φ_2 — магнитные потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения соответственно. Знак плюс соответствует согласному включению обмоток возбуждения, когда н. с. обмоток складываются. Поэтому магнитный

поток с увеличением нагрузки возрастает, что ведет к уменьшению частоты вращения двигателя. При встречном включении обмоток магнитный поток Φ_2 при увеличении нагрузки размагничивает машину (знак минус), увеличивая частоту вращения. При пуске двигателя смешанного возбуждения со встречным включением обмоток возбуждения магнитный поток последовательной обмотки Φ_2 может заметно ослабить результирующий поток двигателя и этим

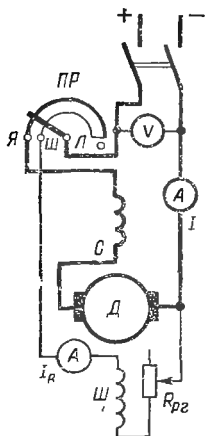


Рис. 7.12. Схема включения двигателя смешанного возбуждения

P, M, n, η

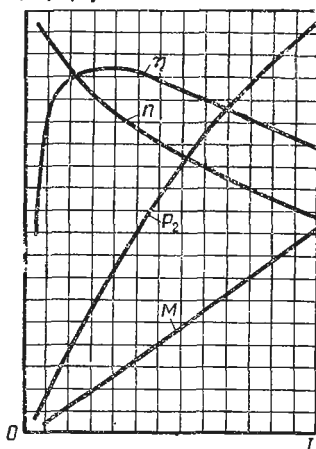


Рис. 7.13. Рабочие характеристики двигателя смешанного возбуждения

осложнить процесс пуска. Чтобы избежать этого, последовательную обмотку таких двигателей иногда замыкают накоротко на все время пуска.

Рабочие характеристики двигателя смешанного возбуждения (рис. 7.13) приближаются к характеристикам двигателя параллельного или последовательного возбуждения, смотря по тому, какая из обмоток возбуждения играет основную роль. Этот двигатель имеет ряд преимуществ по сравнению с двигателем последовательного возбуждения. Он может работать вхолостую, так как поток параллельной обмотки Φ_1 ограничивает частоту вращения двигателя в режиме х. х. и устраняет опасность «разноса». Регулируют частоту вращения реостатом в цепи параллельной обмотки возбуждения. Двигатель смешанного возбуждения применяют тогда, когда требуется значительный пусковой момент, быстрое ускорение при пуске и допустимы относительно большие изменения частоты вращения при изменении нагрузки. В связи с этим двигатели смешанного возбуждения применяют для привода на постоянном токе компрессоров, станков, прокатных станов, подъемников, электрической тяги и др.

ПОТЕРИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

§ 8.1. Виды потерь

При работе электрической машины часть потребляемой ею энергии теряется бесполезно и рассеивается в виде тепла, нагревая отдельные части машины. Потери в электрических машинах подразделяют на основные и добавочные. Основные потери возникают в результате происходящих в машине основных электромагнитных и механических процессов, а добавочные — вследствие продольной пульсации потока, обусловленной зубчатостью якоря, от неравномерного распределения в пазу основного магнитного потока и др. Независимо от режима, в котором работает машина (генератором или двигателем), основные потери подразделяются на электрические, магнитные, или потери в стали, и механические.

Электрические потери. Электрические потери в каждой обмотке $P_{\text{эл}} = I^2 R$. Сопротивление обмотки зависит от ее температуры. Поэтому ГОСТ 2582—72 предусматривает определение потерь в обмотках при расчетной температуре 75°С для классов изоляции обмоток А; 115°С для классов изоляции Е и В; 130°С для классов F и H. Обычно рассчитывают потери в цепи якоря $P_{\text{эл.я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ и в цепи возбуждения $P_{\text{эл.в}} = U_{\text{в}} I_{\text{в}}$ (для параллельной обмотки возбуждения). При температуре θ сопротивление обмотки

$$R_{\theta} = R_0 [1 + \alpha (\theta - \theta_0)], \quad (8.1)$$

где R_0 — сопротивление обмотки при температуре θ_0 ; α — температурный коэффициент сопротивления (для меди $\alpha = 0,004$). К электрическим потерям относят также потери в щеточных контактах. Для двух щеток различной полярности величина потерь $P_{\text{эл.щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}}$, где $\Delta U_{\text{щ}}$ — переходное падение напряжения на щетках, принимаемое в соответствии с маркой щеток: для угольных и графитных 2 В, для металло-графитных 0,6 В.

Магнитные потери. Магнитные потери включают в себя потери на гистерезис и вихревые токи, вызванные перемагничиванием стали. Величина магнитных потерь зависит от магнитной индукции и частоты перемагничивания сердечника якоря f ; так как $f = pn/60$ и не зависит от нагрузки машины, то при $n = \text{const}$ их можно считать постоянными. Потери от гистерезиса (Вт/кг)

$$P_{\text{г}} = \sigma_{\text{г}} f B^2 100, \quad (8.2)$$

где $\sigma_{\text{г}} = 3,2 \div 4,4$ — коэффициент, зависящий от марки стали; $f = pn/60$ — частота перемагничивания; B — наибольшее значение магнитной индукции в стали.

Потери от вихревых токов

$$P_{\text{вих}} = \sigma_{\text{вих}} (f B / 100)^2, \quad (8.3)$$

где $\sigma_{\text{вих}}$ — коэффициент, зависящий от марки и толщины листов стали (для слабо- и среднелегированных марок стали $\sigma_{\text{вих}} = 3,6 \div 2,9$, для высоколегированной $\sigma_{\text{вих}} = 1 \div 0,6$).

Механические потери. Механические потери $P_{\text{мех}}$ состоят из потерь в подшипниках, на трение щеток о коллектор и вентиляционных (потери на трение о воздух вращающихся частей машины). Потери в подшипниках зависят от типа подшипников, от состояния трущихся поверхностей, вида смазки и др. При работе электрической машины эти потери зависят только от частоты вращения и не зависят от нагрузки. Потери в подшипниках $P_{\text{пш}} = k_{\text{тр}} F_{\text{пш}} v_{\text{ш}}$, где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трения; $F_{\text{пш}}$ — давление на подшипник; $v_{\text{ш}}$ — частота вращения шейки вала. Потери на трение щеток $P_{\text{тр.щ}} = k_{\text{тр}} f_{\text{щ}} S_{\text{щ}} v_{\text{к}}$, где $f_{\text{щ}}$ — удельное давление на щетку; $S_{\text{щ}}$ — контактная поверхность всех щеток; $v_{\text{к}}$ — окружная скорость коллектора. Потери на вентиляцию $P_{\text{вен}}$ зависят от конструкции машины и рода вентиляции. В самовентилируемых машинах со встроенным вентилятором потери на вентиляцию $P_{\text{вен}} = k_{\text{вен}} Q v^2$, где $k_{\text{вен}}$ — коэффициент; Q — количество вентилируемого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; v — скорость на внешней окружности вентилятора, $\text{м}/\text{с}$. Общие механические потери $P_{\text{мех}} = P_{\text{пш}} + P_{\text{тр.щ}} + P_{\text{вен}}$. Сумма магнитных и механических потерь составляет потери х. х. $P_0 = P_{\text{с}} + P_{\text{мех}}$.

Добавочные потери. Добавочные потери трудно учитываемые — это потери в полюсных наконечниках, возникающие при вращении якоря и обусловленные его зубчатостью, потери в стали якоря вследствие искажения основного поля реакцией якоря и др. Поэтому в машинах без компенсационной обмотки величину добавочных потерь принимают равной 1% от полезной мощности для генераторов или 1% от подводимой мощности для двигателей. В машинах с компенсационной обмоткой величина добавочных потерь принимается равной 0,5%.

§ 8.2. Коэффициент полезного действия

Зная потери в машине, можно определить коэффициент полезного действия (к. п. д.) машины. Как известно, для генераторов к. п. д. представляет собой отношение электрической полезной мощности к механической мощности на валу: $\eta = P_2 100\% / P_1$. Здесь $P_1 = P_2 + \Sigma P$, где ΣP — сумма всех потерь в машине; $P_2 = UI$ для генератора; U — напряжение на зажимах генератора; I — ток, отдаваемый им в сеть. Тогда для генератора

$$\eta_{\text{г}} = P_2 / (P_2 + \Sigma P) = UI / (UI + \Sigma P) = 1 - \Sigma P / (UI + \Sigma P). \quad (8.4)$$

В двигателях подводимая мощность $P_1 = UI$, где U — напряжение на зажимах двигателя, I — потребляемый двигателем ток. Тогда для двигателя

$$\eta = (P_1 - \Sigma P) / P_1 = (UI - \Sigma P) / (UI) = 1 - \Sigma P / (UI). \quad (8.5)$$

Так как к. п. д. машины зависит от суммы потерь, то он — величина непостоянная, т. е. зависит от нагрузки. При х. х. машин, ког-

да полезная мощность равна нулю, к. п. д. = 0. По мере увеличения нагрузки к. п. д. машины быстро увеличивается. Наибольшее значение он имеет при нагрузке, равной $(0,8-1)P_{\text{ном}}$, когда постоянные потери равны переменным. При значительных перегрузках вследствие увеличения потерь в сопротивлениях цепи якоря к. п. д. снова снижается. На рис. 8.1 представлена зависимость к. п. д. машины $\eta = f(I)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$. Современные электрические машины имеют высокий к. п. д. Так, для машин постоянного тока мощностью 10 кВт к. п. д. $\eta = 0,83 \div 0,87$; мощностью 100 кВт; $\eta = 0,88 \div 0,93$; мощностью 1000 кВт $\eta = 0,92 \div 0,96$. Машины малой мощности имеют меньшее значение к. п. д., например для двигателя мощностью 10 Вт $\eta = 0,3 \div 0,4$. Применяемые методы опытного определения к. п. д. разделяют на прямой и косвенный. Существует ряд способов прямого определения к. п. д. по экспериментальным значениям P_1 и P_2 :

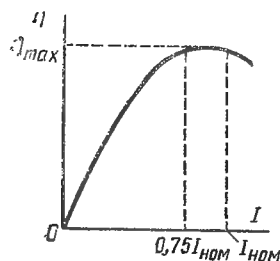


Рис. 8.1. Зависимость к. п. д. от нагрузки

а) способ двигателя-генератора, при котором две одинаковые машины соединяются на одном валу, причем одна из них работает двигателем, а другая — генератором;

б) способ тарированной машины, при котором испытываемая машина служит двигателем и приводит во вращение тарированную электромашину;

в) способ двигателя, при котором испытываемая машина работает в режиме двигателя. Прямой метод определения к. п. д. может дать существенную неточность, поскольку, во-первых, P_1 и P_2 являются близкими величинами, и во-вторых, их экспериментальное определение связано с погрешностями. Поэтому ГОСТ 11828—72 предписывает для машины с $\eta > 70\%$ косвенный способ определения к. п. д., при котором по экспериментальным данным определяют сумму потерь ΣP .

Глава 9 СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 9.1. Электромашинные усилители

В современных производственных электроустановках широко применяют системы непрерывного автоматического регулирования и управления. Один из основных элементов этой системы — усилитель мощности. Существуют различные типы усилителей: электронные, электромагнитные и электромашинные. Последние представляют собой специальную разновидность электромашинных генераторов, которые приводятся во вращение приводными электродвигателями с $n = \text{const}$. Эти машины позволяют получить при малой мощности управления на выходе достаточно большую мощность за счет мощности, получаемой от приводного двигателя. Одной из основных характеристик электромашинных усилителей (ЭМУ)

является коэффициент усиления k_y , равный отношению выходной электрической мощности P_2 к мощности управления P_y :

$$k_y = P_2 / P_y. \quad (9.1)$$

Важное требование к системе регулирования — наименьшее время передачи сигнала управления, но ЭМУ обладает электромагнитной инерцией, обусловленной потоком возбуждения. Быстродействие ЭМУ определяется электромагнитными постоянными времени обмоток:

$$T = L / R, \quad (9.2)$$

где L и R — индуктивность и активное сопротивление обмоток управления. С увеличением коэффициента усиления возрастает также и постоянная времени усилителя. Сопоставляют усилители с различным k_y и T по коэффициенту добротности

$$k_d = k_y / T, \quad (9.3)$$

и называют их *одноступенчатыми*. В многоступенчатых усилителях происходит последовательное многократное усиление мощности. По способу возбуждения различают ЭМУ с продольным и поперечным потоком. В усилителях продольного поля основной поток возбуждения направлен по продольной оси машины. Конструктивно одноступенчатый ЭМУ с продольным потоком (рис. 9.1, а) представляет собой генератор параллельного возбуждения, имеющий одну обмотку независимого возбуждения, которую называют обмоткой управления (ОУ).

Цепь самовозбуждения ЭМУ с обмоткой самовозбуждения (ОС) в настроенном состоянии имеет сопротивление, равное критическому или несколько превышающее его по условию возникновения процесса самовозбуждения. При этом напряжение на выходе усилителя, как генератора с самовозбуждением, равно нулю, так как вольт-амперная характеристика 2 пересекает характеристику холостого хода 1 в начале координат (рис. 9.1, б). Если в обмотке управления ОУ пропустить некоторый ток I_y , то под действием ее н. с. генератор быстро самовозбудится до точки А характеристики х. х. При этом прямая займет положение 2'.

Электромашинные усилители с поперечным полем самые распространенные, их изготовляют обычно с неявновыраженными полюсами с $2p=2$. В обычной машине постоянного тока поперечная реакция якоря искажает поле главных полюсов и часто нарушает коммутацию, поэтому принимаются меры для ослабления попереч-

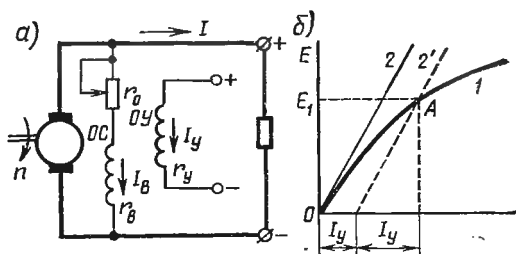


Рис. 9.1. Схема электромашинного усилителя с продольным полем (а) и его характеристика холостого хода (б)

ной реакции якоря. В ЭМУ с поперечным полем поперечный поток реакции якоря используется для получения э. д. с. Для этой цели на коллекторе помещают дополнительную пару вертикальных щеток 2, ось которых перпендикулярна оси основных горизонтальных щеток 1 (рис. 9.2). После подачи входных сигналов на обмотки управления токи этих обмоток I_y создают н. с. и поток Φ_y , который действует в направлении поперек оси короткозамкнутых щеток 1. При пересечении этого относительно небольшого потока в обмотке якоря индуцируется э. д. с., под действием которой создается ток $I_{кз}$. Это является первой ступенью усиления, что по существу пред-

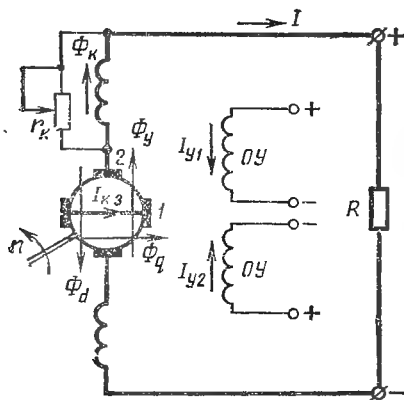


Рис. 9.2. Схема соединения обмоток ЭМУ с поперечным потоком

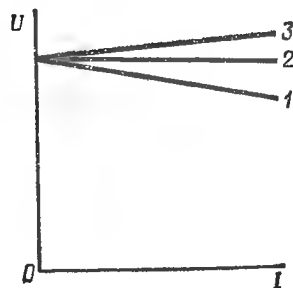


Рис. 9.3. Внешние характеристики ЭМУ

ставляет собой генератор независимого возбуждения, работающий в режиме к. з. Ток $I_{кз}$ создает поперечный поток реакции якоря Φ_q , который направлен вдоль оси горизонтальных щеток 1 и перпендикулярно к оси вертикальных щеток 2. Под действием потока Φ_q в обмотке якоря наводится э. д. с., приложенная между щетками 2. Если к этим щеткам подключена нагрузка, то в цепи вертикальных щеток 1 возникает ток нагрузки I . Следовательно, вторая ступень усиления ЭМУ — цепи поперечных и продольных щеток. Ток нагрузки I создает продольный поток реакции якоря Φ_d , направление которого совпадает с осью вертикальных щеток 2 и является встречным по отношению к потоку Φ_y обмотки управления. Если не принять мер по компенсации потока Φ_d , машина окажется размагниченной и неработоспособной. Поэтому в станину ЭМУ обязательно укладывают компенсационную обмотку, поток которой Φ_k направлен навстречу потоку Φ_d . Точную настройку компенсации осуществляют реостатом r_k , включенным параллельно компенсационной обмотке. Для улучшения коммутации над вертикальными щетками 2, через которые проходит ток нагрузки I , устанавливаются дополнительные полюсы.

Ввиду того, что магнитная цепь усилителя ненасыщена, напряжение U является линейной функцией тока нагрузки I , т. е. внешняя характеристика ЭМУ представляет собой прямую линию (рис. 9.3). При недокомпенсации реакции якоря при увеличении нагрузки напряжение усилителя падает (кривая 1). При полной компенсации напряжение ЭМУ изменяется незначительно, только за счет изменения падения напряжения на якоре (кривая 2). При значительной перекомпенсации (кривая 3) возможно самовозбуждение усилителя, т. е. произвольный рост напряжения при постоянстве тока в обмотке управления. Общий коэффициент усиления ЭМУ с поперечным полем находится в пределах $2000 \div 10\,000$, но иногда достигает 100 000.

§ 9.2. Машины постоянного тока с беспазовым якорем

Современные системы автоматического регулирования предъявляют к исполнительным двигателям постоянного тока жесткие требования: быстродействие, максимальная точность регулирования частоты вращения, высокая коммутационная надежность. В последнее время появились двигатели, у которых обмотку якоря располагают не в пазах, а непосредственно на сердечнике якоря. Машины с гладкими якорями обладают следующими особенностями: обмотка якоря имеет относительно меньшую индуктивность, чем обмотка, размещенная в пазах; отсутствие зубцов дает возможность значительно повысить магнитную индукцию в воздушном зазоре. Уменьшение индуктивности обмоток снижает реактивную э. д. с. в коммутируемых секциях. Наличие относительно большого немагнитного участка магнитной цепи машины уменьшает реакцию якоря, поэтому двигатели с гладким якорем имеют прямолинейные устойчивые характеристики частоты вращения и прямолинейную зависимость момента от тока якоря даже при больших перегрузках. Кроме того, вследствие отсутствия зубцов в двигателе практически отсутствуют пульсации основного магнитного потока, что очень важно при эксплуатации электродвигателя. Целесообразность применения гладкого якоря обусловлена в машинах малой мощности улучшением их характеристик, а в машинах большой мощности — обеспечением достаточной коммутационной на-

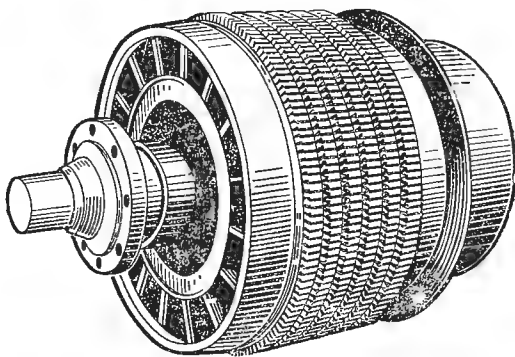


Рис. 9.4. Гладкий якорь с пластмассовыми сегментами до укладки обмотки

Рис. 9.4. Гладкий якорь с пластмассовыми сегментами до укладки обмотки

дежности и улучшением распределения потенциалов на коллекторе. Обмотка якоря крепится либо непосредственно на изолированном сердечнике, либо в пластмассовом слое.

В первом случае на изолированный сердечник укладывают пропитанные эпоксидной смолой секции якорной обмотки, которые закрепляют с помощью бандажной стеклотенты. Во втором случае на гладкой поверхности сердечника якоря устанавливают пластмассовые сегменты, в пазы которых укладывают обмотку (рис. 9.4). Одна из главных проблем, возникающих при изготовлении машин с гладкими якорями,— создание обмотки возбуждения, обеспечивающей большую н. с. при ограниченных габаритах. Применяют такие двигатели в приводах, работающих с широким регулированием частоты вращения и нагрузки (прокатные станы, подъемно-транспортные устройства).

§ 9.3. Униполярные машины

Униполярные генераторы позволяют получать большой постоянный ток (до 500 000 А) при низком напряжении (например, в электролизных установках). Одна из схем униполярного генератора показана на рис. 9.5. Массивный стальной ротор 1 вращается в магнитном поле, которое создается неподвижными кольцевыми катушками обмотки возбуждения 2.

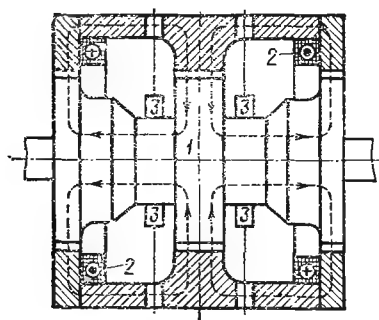


Рис. 9.5. Униполярный генератор

Основной магнитный поток Φ в центральной активной части машины имеет по всей окружности одинаковую полярность, отсюда и происходит название машины. Индуцируемая в стержнях обмотки ротора при его вращении в магнитном поле э. д. с. $E = Blv$ также имеет по всей окружности одинаковое направление. Ток с ротора снимается с помощью неподвижных щеток 3. Применение униполярных

генераторов ограничено в связи с трудностями отвода тока, так как щеточный аппарат получается громоздким. В настоящее время с ротора отводят ток с помощью жидких металлов (ртуть, натрий). Униполярная индукция используется также в магнитогидродинамических (МГД) генераторах. В этих генераторах вместо движущегося проводника используется поток раскаленных ионизированных газов, называемый «плазма».

§ 9.4. Исполнительные двигатели

Исполнительными двигателями называют двигатели, которые применяют в системах автоматического управления и регулирования различных автоматизированных установок и которые предназ-

начены для преобразования электрического сигнала (напряжения управления), получаемого от какого-то измерительного органа или датчика, в механическое перемещение (вращение) вала с целью воздействия на соответствующий регулирующий или управляющий аппарат. Если напряжение и мощность сигнала малы для управления исполнительным двигателем, то применяют промежуточные усилители мощности (магнитные или электронные). Номинальная мощность исполнительных двигателей обычно мала — до 500 ÷ 600 Вт. К этим двигателям предъявляют требования по точности работы и быстродействию: требуется, чтобы зависимости момента M и частоты вращения n от напряжения сигнала (управления) были по возможности линейными.

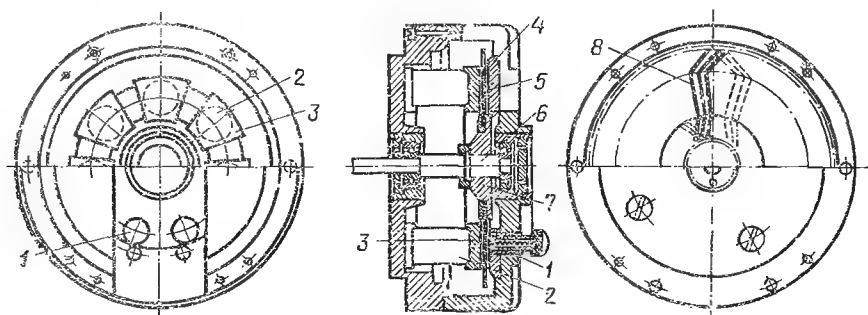


Рис. 9.6. Конструкция двигателя постоянного тока с печатной обмоткой

На рис. 9.6 показан исполнительный двигатель постоянного тока с печатной обмоткой якоря. Якорь этого двигателя имеет вид тонкого диска 5 из немагнитного материала (текстолит, стекло и др.), на обеих сторонах которого печатным способом нанесены проводники обмотки якоря 8. Принцип работы этого двигателя такой же, что и двигателей с цилиндрическим якорем. При включении двигателя в сеть ток в обмотке якоря взаимодействует с магнитным полем возбуждения постоянных магнитов 2, расположенных на статоре двигателя и обращенных своими полюсными наконечниками 3 к одной стороне пластмассового диска якоря. С другой стороны диска расположено кольцо 4 ферромагнитного материала. Это кольцо выполняет те же функции, что и сердечник якоря в двигателях обычной конструкции, т. е. является элементом магнитной системы машины, через который замыкается основной магнитный поток. Якорь двигателя закрепляется на валу 6 втулкой 7. Включение двигателя в сеть осуществляется через щеточный контакт с щеткодержателем 1. Так как секции печатной обмотки одновитковые, а количество секций в обмотке ограничено площадью поверхности диска, то двигатели с печатной обмоткой выполняют обычно на низкое напряжение сети.

§ 9.5. Тахогенераторы

Тахогенераторами называют электрические микромашины, работающие в генераторном режиме и служащие для преобразования частоты вращения в пропорциональный электрический сигнал. При этом пропорциональность преобразования определяется видом выходной характеристики тахогенератора, т. е. зависимостью между входной величиной (частотой вращения вала n) и выходной (напряжением $U_{\text{вых}}$ в выходной обмотке). Большинство тахогенераторов имеет обычную конструкцию машин постоянного тока с независи-

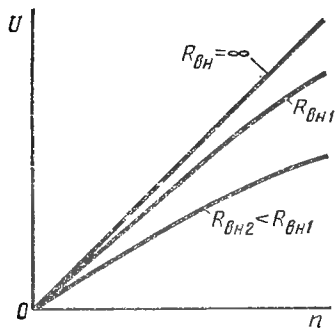


Рис. 9.7. Характеристики тахогенератора

мым возбуждением при $I_{\text{в}} = \text{const}$ или с постоянными магнитами, у которых $\Phi = \text{const}$. При постоянстве магнитного потока $E_{\text{я}} = k_{\text{Е}} n \Phi = k_{\text{Е}} n$ — э. д. с. генератора; $E_{\text{я}} = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = U(1 + R_{\text{я}}/R)$, где $I_{\text{я}} = U/R$ — ток якоря генератора; R — сопротивление внешней цепи, на которую включен генератор. Таким образом, $U = E_{\text{я}}(1 + R_{\text{я}}/R) = k_{\text{Е}} n / (1 + R_{\text{я}}/R)$, т. е. при постоянстве сопротивления нагрузки и цепи якоря сохраняется пропорциональность между напряжением генератора и частотой вращения его якоря.

Характеристики тахогенератора приведены на рис. 9.7 для нескольких значений R . По мере увеличения тока $I_{\text{я}}$ якоря начинает проявляться размагничивающее действие реакции якоря. Величина магнитного потока уменьшается, и характеристика тахогенератора отклоняется от прямой линии вниз. Применение измерительных приборов с большим внутренним сопротивлением уменьшает нелинейность выходной характеристики. Важный показатель тахогенератора — крутизна выходной характеристики, которая представляет собой отношение приращения выходного напряжения к приращению частоты вращения $[B/(\text{об}/\text{мин})]$: $e = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta n$, где $\Delta U_{\text{вых}}$ — приращение выходного напряжения, В; Δn — приращение частоты вращения. В процессе работы тахогенераторов крутизна выходной характеристики может изменяться под действием температуры обмотки возбуждения и переходного падения напряжения в щеточном контакте. Для измерения частоты вращения тахогенератором его вал механически соединяют с валом механизма, частоту вращения которого требуется измерить. На выводы тахогенератора подключают измерительный прибор со шкалой, градуированной в единицах частоты вращения.

§ 9.6. Тяговые электродвигатели

Тяговые электродвигатели приводят в движение подвижной состав на самых различных видах транспорта: на городских, пригородных и магистральных электрических железных дорогах,

на водном, внутризаводском, рудничном транспорте и др. В соответствии с этим тяговые двигатели постоянного тока выполняют на различные мощности и напряжения. По сравнению с машинами стационарного типа условия работы тяговых электродвигателей значительно тяжелее, так как габариты двигателя ограничены диаметром ведущих колес и шириной колеи. Работа двигателя протескает в условиях частого пуска при значительных ускорениях подвижного состава и сопровождается резкими изменениями напряжения на зажимах двигателя, тока и частоты вращения. Таким образом, работа тягового двигателя носит напряженный характер в коммутационном, механическом и тепловом отношении. Обычный тип тягового двигателя — двигатель последовательного возбуждения.

Тяговые двигатели пульсирующего тока. Особенность таких двигателей — то, что их питают от сети переменного тока через выпрямительный блок из кремниевых диодов. Величину пульсации тока оценивают коэффициентом пульсации $k_{\text{пуль}} = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$. Существенный недостаток электродвигателя пульсирующего тока — напряженные потенциальные условия на коллекторе, способствующие возникновению на нем кругового огня. В настоящее время эти двигатели применяют при электрификации железных дорог на однофазном токе промышленной частоты. В СССР напряжение в контактном проводе равно 25 кВ при частоте 50 Гц. Пускают тяговые двигатели за счет постепенного увеличения напряжения на трансформаторе.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Глава 10

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 10.1. Назначение и принцип действия трансформаторов

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный преобразователь с двумя или больше обмотками, предназначенный (наиболее часто) для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Преобразование энергии в трансформаторе осуществляется переменным магнитным полем. Трансформаторы широко применяют при передаче электрической энергии на большие расстояния, при распределении ее между приемниками, а также в различных выпрямительных, усилительных, сигнализационных и других устройствах. При передаче электрической энергии от электростанции к потребителям сила тока в линии обуславливает потери энергии в этой линии и расход цветных металлов на ее устройство. Если при одной и той же передаваемой мощности увеличить напряжение, то сила тока в такой же мере уменьшится, а следовательно, можно будет применить провода с меньшим поперечным сечением. Это сократит расход цветных металлов при устройстве линии электропередачи и снизит потери энергии в ней. Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях синхронными генераторами при напряжении 11—20 кВ; в отдельных случаях применяется напряжение 30—35 кВ. Хотя такие напряжения являются слишком высокими для их непосредственного использования в производстве и для бытовых нужд, они недостаточны для экономичной передачи электроэнергии на большие расстояния. Дальнейшее повышение напряжения в линиях электропередачи (до 750 кВ и более) осуществляют повышающими трансформаторами.

Приемники электрической энергии (лампы накаливания, электродвигатели и др.) из соображений безопасности рассчитывают на более низкое напряжение (110—380 В). Кроме того, изготовление электрических аппаратов, приборов и машин на высокие напряжения связано со значительными конструктивными сложностями, так как токоведущие части этих устройств при высоком напряжении требуют усиленной изоляции. Поэтому высокое напряжение,

при котором происходит передача энергии, не может быть непосредственно использовано для питания приемников и подводится к ним через понижающие трансформаторы.

Электрическую энергию переменного тока по пути от электростанции, где она вырабатывается, до потребителя приходится трансформировать 3—4 раза. В распределительных сетях понижающие трансформаторы нагружаются неодновременно и не на полную мощность. Поэтому полная мощность трансформаторов, устанавливаемых для передачи и распределения электроэнергии, в 7—8 раз больше мощности генераторов, устанавливаемых на электростанциях.

На рис. 10.1 изображена принципиальная схема включения трансформатора, на которой для ясности первичная 1 и вторичная 3 обмотки помещены на разных стержнях стального магнитопровода 2.

В действительности каждая обмотка размещается на обоих стержнях так, что половины двух обмоток находятся на левом, а вторые половины — на правом стержне магнитопровода. При таком расположении обмоток достигается лучшая магнитная связь между ними, благодаря чему снижаются потоки рассеяния, которые не участвуют в процессе трансформирования энергии.

Действие трансформатора основано на явлении взаимной индукции. Если первичную обмотку 1 трансформатора включить в сеть источника переменного тока, то по ней будет протекать переменный ток I_0 , который создает в сердечнике 2 трансформатора переменный магнитный поток. Этот магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки 3, будет индуцировать в ней э. д. с. E_2 . Если вторичную обмотку замкнуть на какой-либо приемник энергии (лампа накаливания 4), то под действием индуцируемой э. д. с. E_2 по этой обмотке и через приемник энергии начнет протекать ток I_2 . Одновременно в первичной обмотке также появится нагрузочный ток I_1' , который в сумме с током I_0 составит ток первичной обмотки I_1 . Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, будет передаваться из первичной сети во вторичную при напряжении, на которое рассчитан приемник энергии, включенный во вторичную сеть.

В целях улучшения магнитной связи между первичной и вторичной обмотками их помещают на стальном магнитопроводе. Обмотки изолируют как друг от друга, так и от магнитопровода. Обмотку более высокого напряжения называют обмоткой *высшего напряжения* (ВН), а обмотку более низкого напряжения — обмоткой *низшего напряжения* (НН). Обмотку, включенную в сеть источ-

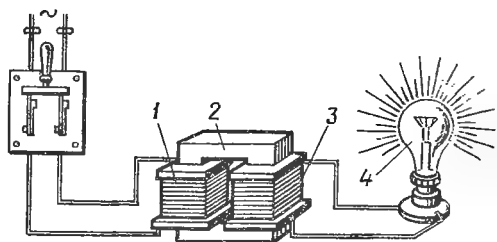


Рис. 10.1. Принципиальная схема включения трансформатора

ника электрической энергии, называют *первичной*; обмотку, от которой энергия подается к приемнику, — *вторичной*. Обычно напряжения первичной и вторичной обмоток неодинаковы. Если первичное напряжение меньше вторичного, трансформатор называют *повышающим*, если же первичное напряжение больше вторичного — *понижающим*. Любой трансформатор может быть использован и как повышающий и как понижающий. Повышающие трансформаторы применяют для передачи электроэнергии на большие расстояния, а понижающие — для распределения электроэнергии между потребителями.

В трехобмоточных трансформаторах на сердечнике помещают три изолированных друг от друга обмотки. Такой трансформатор дает возможность получить два различных напряжения и снабжать электрической энергией две различные группы приемников. Помимо обмоток ВН и НН трехобмоточный трансформатор имеет обмотку *среднего напряжения* (СН).

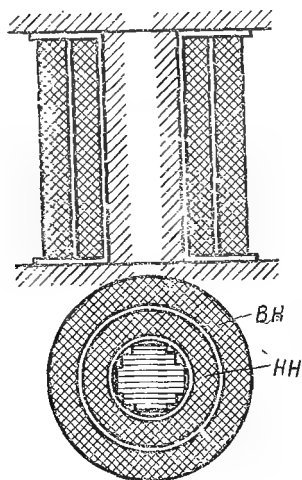


Рис. 10.2. Расположение обмоток трансформатора на магнитопроводе

Обмоткам трансформатора придают преимущественно цилиндрическую форму, выполняя их при малых токах из круглого медного изолированного провода, а при больших токах из медных шин прямоугольного поперечного сечения. Ближе к сердечнику располагают обмотку НН, так как ее легче изолировать от него, чем обмотку ВН. Расположение обмоток на сердечнике трансформатора показано на рис. 10.2. Обмотку НН изолируют от сердечника прослойкой из какого-либо изоляционного материала. Такая же изолирующая прокладка имеется между обмотками ВН и НН.

При цилиндрических обмотках поперечному сечению стержня магнитопровода желательно придать круглую форму, чтобы в площади, охватываемой обмотками, не оставалось немагнитных промежутков. Чем меньше немагнитные промежутки, тем меньше длина витков обмоток, а следовательно, и масса меди при заданной площади сечения стального стержня. Однако стержни круглого сечения изготовлять сложно. Магнитопровод набирают из тонких стальных листов, и для получения стержня круглого сечения понадобилось бы большое число стальных листов различной ширины, а это потребовало бы изготовления множества штампов. Поэтому в трансформаторах большой мощности сердечник имеет ступенчатое поперечное сечение с числом ступеней не более 9—10. Число ступеней сечения сердечника определяется числом углов в одной четверти круга. *Ярмо* магнитопровода, т. е. та его часть, которая соединяет стержни, имеет также ступенчатое сечение.

Для лучшего охлаждения в магнитопроводах мощных трансформаторов устраиваются охлаждающие (вентиляционные) каналы в плоскостях, параллельных и перпендикулярных плоскости стальных листов. Вентиляционные каналы устраивают также и в обмотках.

В трансформаторах малой мощности площадь поперечного сечения провода мала и выполнение обмоток упрощается. Магнитопроводы таких трансформаторов имеют прямоугольное поперечное сечение.

Полезную мощность, на которую рассчитан трансформатор по условиям нагревания, называют *номинальной*. Таким образом, номинальной мощностью трансформатора называется мощность его вторичной обмотки при полной (номинальной) нагрузке. Эта мощность выражается в единицах полной мощности, т. е. в вольт-амперах (В·А) или киловольт-амперах (кВ·А). Все прочие величины, характеризующие работу трансформатора в условиях, на которые он рассчитан, также называют номинальными.

Каждый трансформатор снабжается щитком из материала, не подверженного атмосферным влияниям. Этот щиток прикреплен к баку трансформатора на видном месте и содержит его номинальные данные, которые нанесены травлением, гравировкой, выбиванием или другими способами, обеспечивающими видимость и долговечность знаков. На щитке трансформатора указываются следующие данные (ГОСТ 11677—74):

1. Наименование организации, в систему которой входит завод-изготовитель.
2. Наименование и адрес или марка завода-изготовителя.
3. Год выпуска.
4. Заводской номер.
5. Обозначение типа.
6. Номер стандарта.
7. Номинальная мощность (кВ·А). Для трехобмоточных трансформаторов указана мощность каждой обмотки.
8. Напряжения номинальные и напряжения ответвлений обмоток (В или кВ).
9. Номинальные токи каждой обмотки (А).
10. Число фаз.
11. Частота тока (Гц).
12. Схема и группа соединения обмоток трансформатора.
13. Напряжение короткого замыкания (%).
14. Род установки (внутренняя или наружная).
15. Способ охлаждения.
16. Полная масса трансформатора (кг или т).
17. Масса масла (кг или т).
18. Масса активной части (кг или т).
19. Положения переключателя, обозначенные на его приводе.

Для трансформаторов с искусственным воздушным охлаждением дополнительно указана мощность трансформатора при отключенном искусственном охлаждении.

Заводской номер трансформатора выбит на баке под щитком, на крышке около ввода ВН фазы А и на левом конце верхней полки прессующей балки магнитопровода.

Условное обозначение трансформатора состоит из буквенной и цифровой частей. Буквы означают следующее: Т — трехфазный трансформатор, О — однофазный трансформатор, М — естественное масляное охлаждение, Д — масляное охлаждение с дутьем (искусственное воздушное и с естественной циркуляцией масла), Ц — масляное охлаждение с принудительной циркуляцией масла через водяной охладитель, ДЦ — масляное с дутьем и принудительной циркуляцией масла, Г — грузоупорный трансформатор (указывается в конце), Н (в конце после обозначения типа) — трансформатор с регулированием напряжения под нагрузкой, Н (на втором месте) — заполнение негорючим жидким диэлектриком. Если в обозначении типа трансформатора буква Т стоит третьей, то она обозначает трехобмоточный трансформатор.

Первое число, стоящее после буквенного обозначения трансформатора, показывает номинальную мощность (кВ·А), второе число — номинальное напряжение обмотки ВН (кВ). Так, например, тип ТМ — 6300/65 означает трехфазный двухобмоточный трансформатор с естественным масляным охлаждением мощностью 6300 кВ·А и напряжением обмотки ВН 35 кВ. Тип ТЦТНГ — 63 000/220 означает трехфазный трехобмоточный трансформатор с принудительной циркуляцией масла, с регулированием напряжения под нагрузкой, грузоупорный, мощностью 63 000 кВ·А и напряжением обмотки ВН 220 кВ.

Буква А в обозначении типа трансформатора означает автотрансформатор. В обозначении трехобмоточных автотрансформаторов букву А ставят либо первой, либо последней в обозначении типа. Если автотрансформаторная схема основная (обмотки ВН и СН образуют автотрансформатор, а обмотка НН дополнительная), то букву А ставят первой. В случае, когда автотрансформаторная схема дополнительная, букву А ставят последней.

§ 10.2. Устройство магнитопроводов однофазных трансформаторов

Магнитопроводы трансформаторов собирают из изолированных пластин или ленты высоколегированной стали. В зависимости от формы магнитопровода и расположения обмоток на нем однофазные трансформаторы подразделяют на стержневые, броневые и тороидальные (кольцеобразные). Стержневой магнитопровод (рис. 10.3, а) имеет два стержня, охватываемых обмотками. Часть магнитопровода, замыкающую магнитную цепь, называют **ярмом**. На каждом стержне магнитопровода помещают катушку, состоящую из половинок первичной и вторичной обмоток. Такое расположение обмоток на магнитопроводе обеспечивает лучшую магнитную связь между ними, чем при размещении на различных стерж-

нях, как это условно изображают на схемах. Хорошая магнитная связь уменьшает изменение вторичного напряжения трансформатора, которые возникают при изменениях его нагрузки. Половины каждой обмотки, помещенные на правом и левом стержнях магнитопровода, соединяются между собой последовательно так, чтобы их н. с. совпадали по направлению.

В трансформаторе броневого типа (рис. 10.3, б) первичная и вторичная обмотки помещены на среднем стержне магнитопровода. Таким образом, в этом трансформаторе обмотки частично охватываются (бронируются) ярмом. Магнитный поток, пронизывающий стержень магнитопровода, разветвляется на две части. Поэтому ярмо имеет поперечное сечение, вдвое меньшее сечения

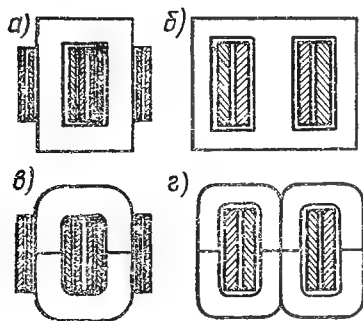


Рис. 10.3. Схемы устройства трансформаторов

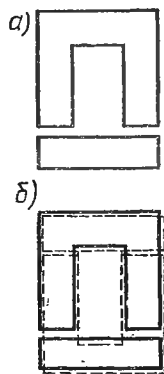


Рис. 10.4. Схема сборки магнитопровода

стержня. Броневого магнитопровод обладает рядом конструктивных достоинств — один комплект обмоток вместо двух при стержневом магнитопроводе, высокий коэффициент заполнения окна магнитопровода обмоточным проводом, частичная защита обмотки ярмом от механических повреждений.

Ленточные разрезные сердечники из холоднокатаной стали могут быть также броневыми (рис. 10.3, в) и стержневыми (рис. 10.3, г). При сборке трансформатора с ленточным сердечником магнитопровод разрезают для того, чтобы поместить обмотки на сердечнике, и затем верхнюю и нижнюю половины магнитопровода соединяют вместе.

Трансформаторы больших и средних мощностей выполняют стержневыми, так как в броневого трансформаторах обмотки ВН сложно изолировать от магнитопровода. Трансформаторы малой мощности чаще выполняют броневыми.

Основные достоинства стержневого трансформатора: большая поверхность охлаждения обмотки; малая индуктивность рассеяния вследствие половинного числа витков на каждом стержне и мень-

шей толщины намотки; меньший расход обмоточного провода, чем у броневых трансформаторов, так как уменьшение толщины намотки вызывает уменьшение средней длины витка обмотки; значительно меньшая, чем в броневом трансформаторе, чувствительность к внешним магнитным полям, так как э. д. с. помех, наводимых в обеих катушках трансформатора, имеют противоположные знаки и взаимно уничтожаются.

Для уменьшения намагничивающего тока магнитопроводы трансформаторов делают с уширенным ярмом. В этом случае сечение ярма у стержневого трансформатора делают больше сечения стержня, а у броневых — больше половины сечения стержня.

Магнитопроводы трансформаторов собирают встык (рис. 10.4, а) или внахлест (рис. 10.4, б) из П-образных стальных пластин. Пластины также могут иметь форму Г-образную, Ш-образную, прямоугольную и др. При сборке встык сердечник состоит из двух частей, собранных из стальных пластин. После размещения обмоток на магнитопроводе обе части его скрепляют. При сборке внахлест пластины чередуются так, чтобы у лежащих друг на друге листах разрезы были с разных сторон сердечника. При этом один слой стальных листов (например, нечетный) укладывается так, как показано на рисунке сплошной линией, а другой слой (четный) — прерывистой. При сборке встык размещать обмотки на магнитопроводе проще, так как в этом случае нет необходимости в расшивке верхнего ярма и последующей его повторной шихтовке при сборке трансформатора на заводе, а также при демонтаже его в процессе ремонта.

Однако при установке ярма встык со стержнями стальные пластины стержня и ярма будут смещены, так как сделать их совпадающими практически невозможно. Вследствие этого пластины стержня и ярма окажутся замкнутыми, что вызовет резкое увеличение вихревых токов, а соответственно и потерь в стали магнитопровода. Это может вызвать недопустимый нагрев стали в местах стыков, при котором пластины в месте замыкания сплавляются в сплошную массу («пожар» в стали), и трансформатор выйдет из строя. Поэтому при сборке магнитопровода встык между ярмом и стержнем устанавливают прокладку из изоляционного материала. Однако установка изоляционных прокладок в местах стыков увеличивает магнитное сопротивление магнитопровода, что увеличивает реактивный намагничивающий ток, потребляемый трансформатором из сети для возбуждения магнитного поля. При тщательной сборке шихтованного магнитопровода зазоры между пластинами стержня и ярма можно сделать очень малыми, так что магнитное сопротивление магнитопровода будет относительно небольшим.

После сборки магнитопровода его стягивают болтами или шпильками. Стяжные планки, болты и другое изолируют от тела магнитопровода электрокартоном или бумагой для того, чтобы предотвратить возможность образования короткозамкнутых витков вокруг магнитопровода или его части. Образование короткозамкнутых витков приводит к аварии.

§ 10.3. Устройство обмоток трансформаторов

Обмотки трансформаторов изготавливают из меди или алюминия. Для трансформаторов небольшой мощности, т. е. при небольших токах ($\approx$ до 25 А для воздушных и до 45 А для масляных трансформаторов), обмотки выполняют из изолированного провода круглого поперечного сечения. Параллельное соединение витков дает возможность применить провод круглого поперечного сечения при относительно больших токах в обмотках и облегчает процесс изготовления последних. При больших мощностях и токах обмотки изготавливают из проводников прямоугольного поперечного сечения.

Для изоляции обмоток и других токоведущих частей трансформатора применяют изоляционные материалы, которые должны обеспечивать надежную работу трансформатора в условиях его эксплуатации при значительных колебаниях температуры нагрева.

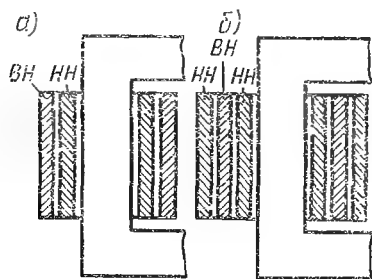


Рис. 10.5. Схема концентрических обмоток трансформатора

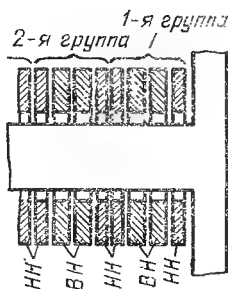


Рис. 10.6. Схема дисковых чередующихся обмоток

Конструкция обмоток должна обеспечивать хорошее их охлаждение, так чтобы температура нагрева обмоток не превышала пределов, установленных для соответствующих классов изоляции. Изоляция обмоток должна выдерживать без повреждений длительное воздействие на нее переменного электрического поля, имеющегося в трансформаторе при нормальной работе, и кратковременные перенапряжения, возникающие в условиях эксплуатации трансформаторов. Обмотки трансформаторов должны выдерживать механические воздействия, которым они подвергаются в процессе сборки трансформатора и в условиях эксплуатации при к. з.

По способу размещения на магнитопроводе обмотки трансформаторов могут быть концентрическими и дисковыми чередующимися. Концентрические обмотки выполняют в виде цилиндров, размещаемых на магнитопроводе концентрически. Внутри (ближе к сердечнику) обычно размещают обмотку НН, требующую меньшей изоляции относительно магнитопровода, снаружи — обмотку ВН (рис. 10.5, а). В некоторых случаях для уменьшения индуктивного сопротивления обмоток, т. е. для уменьшения магнитного рассеяния, находят применение двойные концентрические обмотки (рис. 10.5, б), в которых обмотку НН делят на две части с одина-

ковым числом витков. Между половинами обмотки НН помещают обмотку ВН. Подобным образом может быть выполнена тройная концентрическая обмотка, в которой обмотка НН состоит из трех частей, а обмотка ВН — из двух. В СССР применяют главным образом концентрические обмотки.

В дисковых чередующихся обмотках катушки НН и ВН, изготовленные в виде отдельных дисков, размещены на магнитопроводе в чередующемся порядке (рис. 10.6). Вся обмотка подразделяется на симметричные группы, состоящие из одной или нескольких катушек ВН и расположенных по обе стороны от них двух или нескольких катушек НН. Чередующиеся обмотки на практике применяют только для специальных трансформаторов. При высоких напряжениях эти обмотки не применяют из-за сложности изоляции и большого количества промежутков между катушками НН и ВН.

Конструктивно концентрические обмотки выполняют цилиндрическими, катушечными, непрерывными, винтовыми и др.

Цилиндрические обмотки. Однослойные и двухслойные цилиндрические обмотки наматывают из провода прямоугольного поперечного сечения в один или несколько параллельных проводов. В трехслойных (и при большем числе слоев) обмотках между слоями оставляют вертикальный канал. Слой обмотки составляют витки, наматываемые вплотную друг к другу. Начало и конец двухслойной обмотки выводят из верхней ее части и располагают у верхнего ярма. Такие обмотки используются в качестве обмоток НН трансформаторов мощностью до 630 кВ·А.

Многослойные цилиндрические обмотки наматывают из проводов круглого сечения, размещаемых вдоль всего стержня в несколько слоев, между которыми прокладывают изоляцию из кабельной бумаги. Обычно такую обмотку выполняют из двух катушек, между которыми оставляют вертикальный охлаждающий канал. Многослойные цилиндрические обмотки применяют в качестве обмоток ВН для трансформаторов мощностью до 630 кВ·А при напряжениях до 35 кВ. Цилиндрические обмотки просты в производстве, но их механическая прочность по отношению к осевым силам невелика (при намотке провода плашмя), так как сравнительно малы радиальные размеры обмоток.

Катушечная многослойная обмотка. Она отличается от многослойной цилиндрической тем, что разделена по высоте на отдельные катушки и поэтому сложнее в производстве. Между слоями катушки прокладывают кабельную или телефонную бумагу, а между отдельными катушками — шайбы из электрокартона. Между отдельными катушками (обычно через две) делают охлаждающие каналы. Катушечные многослойные обмотки применяют в качестве обмоток ВН трансформаторов мощностью до 100 кВ·А и напряжением до 35 кВ.

Непрерывная обмотка. Ее наматывают по спирали из провода прямоугольного поперечного сечения. Она состоит из нескольких десятков дисковых катушек, соединенных между собой без пайки. При изготовлении обмотки провод в каждой ка-

тушке укладываются плашмя по спирали и наматывают на изоляционный цилиндр или стальной шаблон. Между изоляционными цилиндром и катушками обмотки, а также между отдельными катушками имеются охлаждающие каналы. Каждая катушка состоит из нескольких витков, а каждый виток — из одного или нескольких параллельных проводов. При нескольких параллельных проводах намотку их производят с перекладкой (транспозицией). Непрерывные обмотки, несмотря на сложность их изготовления, в настоящее время широко используют в трансформаторостроении благодаря их высокой механической прочности. Такие обмотки применяют в качестве обмоток высшего и низшего напряжения трансформаторов мощностью более 1000 кВ·А.

Винтовые обмотки. Их наматывают из нескольких параллельных проводников прямоугольного поперечного сечения. Параллельные провода располагают друг над другом (перпендикулярно оси обмотки) в отличие от цилиндрических обмоток, у которых параллельные провода укладываются рядом по линии, параллельной оси обмотки. Витки обмотки укладывают винтовой линией, имеющей один или несколько ходов. В винтовых обмотках необходима перекладка (транспозиция) проводников, образующих один виток, для равномерного распределения тока между параллельными проводами. Перекладка проводов создает такие условия, при которых каждый провод в пределах одного витка попеременно занимает все возможные положения. Винтовые обмотки могут иметь до 20, а иногда и более параллельных проводов. Они, так же как и непрерывные обмотки, обладают высокой механической прочностью, их применяют в качестве обмоток НН при больших токах.

§ 10.4. Магнитные потоки и э. д. с. обмоток трансформатора

При включении первичной обмотки трансформатора в сеть переменного тока по этой обмотке протекает ток, создающий магнитное поле. Большая часть магнитных линий замкнется по стальному магнитопроводу, образуя основной магнитный поток Φ_0 , который пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмоток (рис. 10.7). Некоторая часть магнитных линий замкнется по немагнитной среде, образуя поток рассеяния первичной обмотки Φ_{s1} . Магнитные линии потока рассеяния пронизывают витки только первичной обмотки и в процессе трансформирования энергии участия не принимают. При нагрузке трансформатора в его вторичной обмотке протекает ток I_2 , возбуждающий свое магнитное поле. Так как основной магнитный поток в магнитопроводе трансформатора сцеплен со всеми витками первичной и вторичной обмоток, то он создается взаимодействием н. с. или токов этих обмоток. Часть магнитных линий поля, возбуждаемого током вторичной обмотки, замкнется через немагнитную среду, образуя поток рассеяния вторичной обмотки Φ_{s2} . Этот магнитный поток не взаимодействует с потоком первичной обмотки.

Потоки рассеяния первичной Φ_{s1} и вторичной Φ_{s2} обмоток обычно очень малы по сравнению с основным магнитным потоком: магнитные линии потоков рассеяния замыкаются через воздух (или другой изоляционный материал) и встречают на своем пути очень большое магнитное сопротивление, тогда как основной магнитный поток замыкается по стали магнитопровода и встречает на своем пути относительно малое магнитное сопротивление. Потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток примерно одинаковы и сдвинуты по фазе на угол, близкий к 180° . Основной магнитный поток не совпадает по фазе с потоком рассеяния любой обмотки. Так, например, при чисто активной нагрузке (рис. 10.8, а) потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток представляются

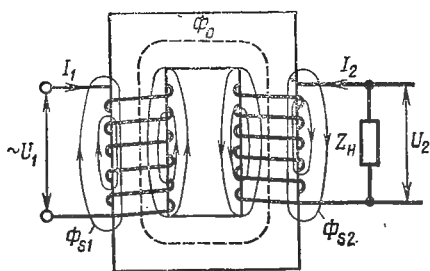


Рис. 10.7. Схема работы трансформатора

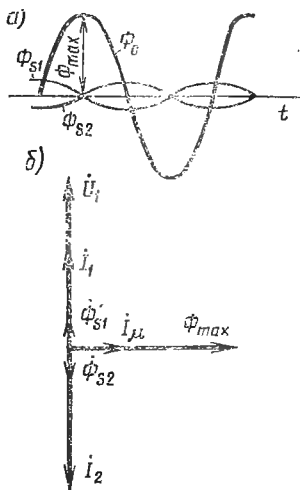


Рис. 10.8. Волновая (а) и векторная (б) диаграммы магнитных потоков трансформатора

синусоидами, имеющими одинаковые амплитуды и находящиеся в противофазе. Основной магнитный поток изображен синусоидой, сдвинутой относительно синусоид потоков рассеяния на четверть периода. При этом амплитуда основного магнитного потока много больше амплитуд потоков рассеяния. На рис. 10.8, б изображена упрощенная векторная диаграмма трансформатора при чисто активной нагрузке. По вертикальной оси вверх направлен вектор приложенного напряжения U_1 . Амплитуда основного магнитного потока, изображенная вектором $\Phi_{\max}$, повернута относительно вектора приложенного напряжения на $\pi/2$ в сторону отставания. При чисто активной нагрузке трансформатора ток вторичной обмотки I_2 окажется отстающим относительно основного магнитного потока примерно на четверть периода (на диаграмме он изображен повернутым на $\pi/2$ относительно вектора $\Phi_{\max}$), а ток первичной обмотки I_1 будет близок к совпадению с приложенным напряжением по фазе (на диаграмме он изображен совпадающим с вектором U_1). Потоки рассеяния совпадают по фазе с токами, их создающими.

Основной магнитный поток возбуждается намагничивающим током I_μ , протекающим по первичной обмотке трансформатора

и совпадающим по фазе с магнитным потоком. Следовательно, намагничивающий ток отстает от приложенного напряжения на $\pi/2$ по фазе и является чисто реактивным, потребляемым из сети источника энергии. Таким образом трансформатор потребляет реактивную намагничивающую мощность $P_\mu = I_\mu U_1$, которая не участвует в процессе трансформирования энергии и снижает коэффициент мощности $\cos \varphi$, увеличивая габариты трансформатора.

Величина намагничивающего тока зависит от магнитных свойств материала магнитопровода. На рис. 10.9 показаны магнитные характеристики стали. Чем больше магнитная проницаемость стали,

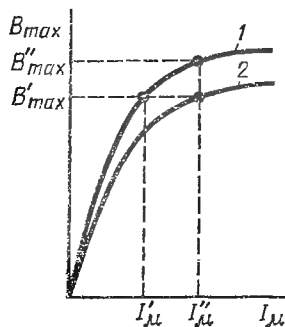


Рис. 10.9. Магнитные характеристики различных марок стали

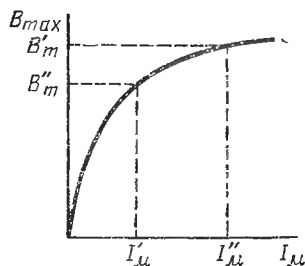


Рис. 10.10. Намагничивающие токи при различных значениях магнитной индукции

тем выше пройдет магнитная характеристика. Если магнитопровод выполнить из стали с большей магнитной проницаемостью (кривая 1), то для создания в магнитопровode магнитной индукции B'_max потребуется меньший намагничивающий ток, чем при магнитопровode из стали с меньшей магнитной проницаемостью (кривая 2), т. е. $I'_\mu < I''_\mu$. Из сопоставления этих кривых видно, что при одном и том же намагничивающем токе I_μ'' в магнитопровode из стали с большей магнитной проницаемостью магнитная индукция будет больше, чем в магнитопровode с меньшей магнитной проницаемостью ($B''_\text{max} > B'_\text{max}$).

Следовательно, применение для магнитопроводов трансформаторов сталей с более высокой магнитной проницаемостью дает возможность увеличить магнитную индукцию и уменьшить поперечное сечение магнитопровода, что в свою очередь уменьшает массу магнитопровода и обмоток трансформатора.

Из-за насыщения стали магнитную индукцию в магнитопровode нельзя беспредельно увеличивать, так как сравнительно небольшое увеличение магнитной индукции (рис. 10.10) выше определенного предела приводит к резкому увеличению намагничивающего тока и увеличивает потребление реактивной мощности из сети. Величина намагничивающего тока в сильной степени зависит от качества сборки магнитопровода. Если при сборке отдельные части

магнитопровода неплотнo прилегают друг к другу, так что между стержнем и ярмом имеется некоторый немагнитный промежуток, то это вызовет резкое увеличение магнитного сопротивления и значительное увеличение намагничивающего тока, необходимого для возбуждения магнитного потока в магнитопроводе. При любом изменении магнитного потока, сцепленного с каким-либо витком, в этом витке индуцируется э. д. с., равная по величине и обратная по знаку изменению магнитного потока во времени.

Обмотки трансформатора имеют обычно большое число витков. В каждом витке первичной и вторичной обмоток индуцируется одинаковая э. д. с., так как все витки этих обмоток сцеплены с одним и тем же магнитным потоком. Таким образом, э. д. с. каждой обмотки равна сумме э. д. с. всех ее витков, т. е. произведению числа витков на э. д. с., индуцированную в одном витке. Если w_1 — число витков первичной, а w_2 — число витков вторичной обмотки трансформатора, то индуцированные основным магнитным потоком трансформатора Φ_0 э. д. с. обмоток

$$e_1 = -w_1(d\Phi_0/dt) \text{ и } e_2 = -w_2(d\Phi_0/dt).$$

Кроме того, как в первичной, так и во вторичной обмотках индуцируются э. д. с. от потоков рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} :

$$e_{s1} = -w_1(d\Phi_{s1}/dt) \text{ и } e_{s2} = -w_2(d\Phi_{s2}/dt).$$

Положим, что основной магнитный поток синусоидален, т. е. $\Phi_0 = \Phi_{\max} \sin \omega t$. Тогда э. д. с. первичной обмотки

$$e_1 = -w_1 \omega \Phi_{\max} \cos \omega t = w_1 \omega \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2),$$

т. е. кривая e_1 — синусоида, отстает от основного потока на $\pi/2$.

Действующее значение э. д. с. первичной обмотки

$$E_1 = E_{\max}/\sqrt{2} = w_1 f \Phi_{\max} 2\pi/\sqrt{2} = 4,44 w_1 f \Phi_{\max},$$

вторичной обмотки $E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m$.

Глава 11

ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА

§ 11.1. Опыт холостого хода трансформатора

Холостым ходом трансформатора является такой предельный режим его работы, когда вторичная обмотка трансформатора разомкнута и ток вторичной обмотки $I_2 = 0$. Опыт х. х. позволяет определить коэффициент трансформации, ток, потери и сопротивления х. х. трансформатора. При опыте х. х. первичную обмотку трансформатора включают в сеть переменного тока с напряжением U_1 (рис. 11.1). Под действием приложенного напряжения по первичной обмотке протекает ток $I_1 = I_0$, равный току х. х., который составляет 5—10% номинального, а в трансформаторах малой мощности (десятки вольт-ампер) — $>30\%$.

Для измерения тока х. х., приложенного к первичной обмотке напряжения и потребляемой мощности в цепь первичной обмотки

трансформатора, включены измерительные приборы (амперметр A , вольтметр V и ваттметр W). Вторичная обмотка трансформатора замкнута на вольтметр, сопротивление которого очень велико, так что ток вторичной обмотки $I_2=0$.

Ток х. х. возбуждает в магнитопроводе трансформатора магнитный поток, который индуцирует э. д. с. как в первичной, так и во вторичной обмотках. Действующие значения э. д. с. обмоток $E_1=4,44\omega_1 f \Phi_{\max}$ и $E_2=4,44\omega_2 f \Phi_{\max}$, где ω_1 и ω_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора; $\Phi_{\max}$ — амплитуда магнитного потока; f — частота тока.

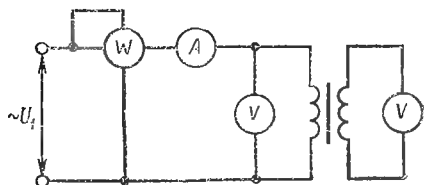


Рис. 11.1. Схема опыта х. х. однофазного трансформатора

Так как во вторичной обмотке трансформатора тока нет и, следовательно, нет падения напряжения в сопротивлении этой обмотки, то э. д. с. $E_2=U_2$ и определяется показанием вольтметра, включенного в эту обмотку.

В первичной обмотке протекает ток х. х., очень малый по сравнению с номинальным, так что падение напряжения в сопротивлении первичной обмотки будет очень мало по сравнению с приложенным напряжением. Поэтому приложенное напряжение практически уравнивается э. д. с. первичной обмотки: $U_1 \approx -E_1$. Следовательно, э. д. с. первичной обмотки определяется показанием вольтметра, включенного в цепь первичной обмотки при опыте х. х.

Коэффициентом трансформации называют отношение напряжения обмотки ВН к напряжению обмотки НН при х. х.: $k = U_2/U_1 = E_2/E_1 = \omega_2/\omega_1$.

Для большей точности измерения при опыте х. х. первичной обмоткой является обмотка НН, а вторичной — обмотка ВН, так как номинальный ток обмотки НН будет больше, чем номинальный ток обмотки ВН. Так как ток х. х. небольшой и составляет несколько процентов номинального тока, то, используя в качестве первичной обмотку НН, ток х. х. окажется больше и может быть измерен более точно, чем в случае использования обмотки ВН в качестве первичной.

Для трехфазного трансформатора различаются конструктивный и эксплуатационный коэффициенты трансформации. *Конструктивный* коэффициент трансформации определяет соотношение чисел витков обмоток ВН и НН и равен отношению фазных напряжений. *Эксплуатационный* коэффициент трансформации равен отношению линейных напряжений на стороне ВН и НН.

Если схемы соединения обмоток ВН и НН одинаковы (например, звезда — звезда или треугольник — треугольник), то отношение фазных и линейных напряжений также одинаковы, т. е. конструк-

тивный и эксплуатационный коэффициенты трансформации равны ($k_k = k_a$). Если же схемы соединения обмоток ВН и НН различны (звезда — треугольник или треугольник — звезда), то конструктивный и эксплуатационный коэффициенты трансформации отличаются в $\sqrt{3}$ раз.

При опыте х.х. помимо напряжений первичной и вторичной обмоток измеряются ток х.х. I_0 и мощность P_0 , потребляемая трансформатором. Ток х.х. в фазе обмотки трехфазного трансформатора I_0 при соединении первичной обмотки в звезду равен измеренному току I ($I_0 = I$), а при соединении первичной обмотки в треугольник — в $\sqrt{3}$ раза меньше измеренного ($I_0 = I/\sqrt{3}$). Мощность, потребляемая трансформатором при х.х., P_0 практически расходуется на покрытие потерь в стали за счет гистерезиса и вихревых токов ($P_c = P_0$), так как потери в проводах первичной обмотки ничтожно малы. При испытании трехфазного трансформатора в этих выражениях следует иметь в виду фазные значения напряжения и тока, а также мощность, отнесенную к одной фазе, $P_0/3$ (P_0 — показания ваттметра). Так как токи в фазах при х.х. трехфазного трансформатора различны, то за значение тока х.х. условно принимают его среднее значение для трех фаз; $I_0 = (I_{0A} + I_{0B} + I_{0C})/3$.

§ 11.2. Ток холостого хода

При х.х. трансформатора под действием приложенного напряжения U_1 в первичной обмотке протекает ток х.х. I_0 . Намагничивающая сила первичной обмотки $F_0 = I_0 \omega_1$ возбуждает переменное магнитное поле, большая часть магнитных линий которого замкнется через магнитопровод, образуя магнитный поток. Основной магнитный поток с амплитудой Φ_m пронизывает витки первичной и вторичной обмоток и индуцирует в этих обмотках э.д.с. Если бы между основным потоком и током х.х. существовала пропорциональность, то для создания синусоидального изменяющегося во времени магнитного потока потребовался бы также синусоидально-изменяющийся ток. Однако при сердечнике из магнитного материала вследствие насыщения магнитный поток не будет пропорционален току.

В магнитопроводе трансформатора при его работе выделяются потери на гистерезис и вихревые токи, называемые потерями в стали. В трансформаторах при частоте тока 50 Гц потери на гистерезис в несколько раз больше потерь на вихревые токи, так что потери в стали в основном определяются гистерезисными потерями. Положим, что для материала магнитопровода трансформатора магнитная характеристика, т. е. зависимость магнитного потока от тока х.х., представлена шлейфом петли гистерезиса (кривая 1 на рис. 11.2). Если приложенное к первичной обмотке напряжение синусоидально, то основной магнитный поток будет также изменяться синусоидально во времени (кривая 2). Каждому значению

магнитного потока соответствуют различные значения тока $x.x.$ согласно восходящей и нисходящей ветвям магнитной характеристики материала магнитопровода. На рисунке показано определение одной точки кривой тока $x.x.$ (кривая 3). Для произвольно выбранного момента времени t_1 определим на временной диаграмме магнитный поток, значение которого отложим на восходящей ветви магнитной характеристики, а затем по магнитной характеристике определим ток $x.x.$, необходимый для создания магнитного потока. Это значение тока отложим на временной диаграмме для момента t_1 . Так же могут быть определены значения тока $x.x.$ для любых моментов времени. По найденным таким образом точкам

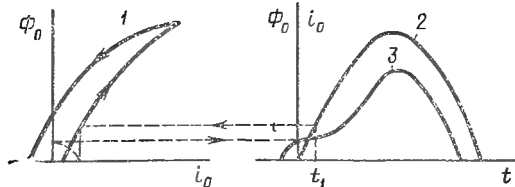


Рис. 11.2. Кривые магнитного потока и тока

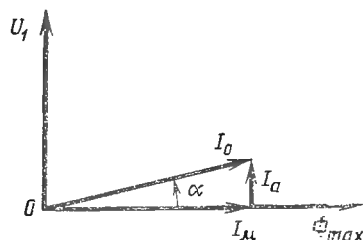


Рис. 11.3. Векторная диаграмма напряжения, магнитного потока и тока $x.x.$

на временной диаграмме можно построить кривую тока $x.x.$ (кривая 3). Эта кривая несинусоидальна и опережает кривую магнитного потока (проходит через нулевые значения раньше) на некоторое время t_0 . Произведение этого отрезка времени на угловую скорость ω равно углу гистерезисного опережения $\alpha = \omega t_0$. При построении векторных диаграмм несинусоидальный ток $x.x.$ считается таким синусоидальным током, действующее значение которого равно действующему значению реального тока.

Таким образом, за счет потерь в стали ток $x.x.$ опережает по фазе создаваемый им магнитный поток и на векторной диаграмме (рис. 11.3) изображается вектором I_0 , повернутым относительно вектора $\Phi_{\max}$ на угол α в сторону опережения. Поэтому ток I_0 может быть представлен в виде двух составляющих: реактивной составляющей I_μ , совпадающей с основным магнитным потоком, и активной составляющей I_a , параллельной вектору приложенного напряжения. Реактивная составляющая тока $x.x.$ I_μ является намагничивающим током, создающим основной магнитный поток, и зависит от магнитного сопротивления магнитопровода. Чем большим будет магнитное сопротивление магнитопровода, тем большим окажется и намагничивающий ток. Активная составляющая тока $x.x.$ I_a потребляется на покрытие потерь в стали и зависит от свойств материала магнитопровода, магнитной индукции и толщины стальных листов, из которых собран магнитопровод. Чем больше потери в стали магнитопровода, тем большей будет и активная составляющая тока $x.x.$

§ 11.3. Векторная диаграмма и эквивалентная схема трансформатора при холостом ходе

Основной магнитный поток в магнитопроводе трансформатора индуцирует в первичной и во вторичной обмотках э. д. с. E_1 и E_2 . Помимо основного магнитного потока существует поток рассеяния первичной обмотки Φ_{s1} . Так как при х.х. во вторичной обмотке тока нет, то эта обмотка не возбуждает потока рассеяния. Магнит-

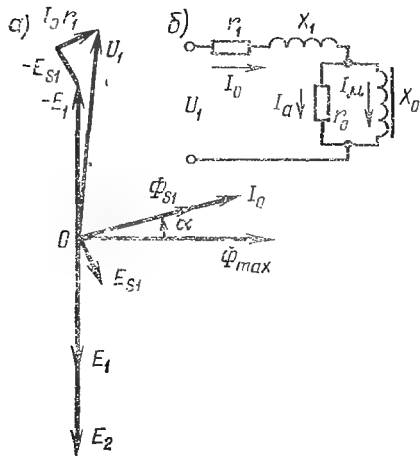


Рис. 11.4. Векторная диаграмма (а) и эквивалентная схема (б) трансформатора при х.х.

ные линии, образующие поток рассеяния, пронизывают витки только первичной обмотки, в которой индуцирует э. д. с. рассеяния E_{s1} .

Поток рассеяния, замыкающийся через магнитную среду и встречающий на своем пути большое немагнитное сопротивление, очень мал по сравнению с основным магнитным потоком в магнитопроводе трансформатора ($\Phi_{s1} \ll \Phi_{max}$). Поэтому э. д. с. рассеяния также очень мала по сравнению с э. д. с., индуцированной основным магнитным потоком ($E_{s1} \ll E_1$). Таким образом, в первичной обмотке трансформатора помимо приложенного напряжения U_1 возникают э. д. с. от основного магнитного потока E_1 и от потока рассеяния E_{s1} . Первичная

обмотка обладает активным сопротивлением r_1 , падение напряжения на котором при х.х. равно $I_0 r_1$. Согласно второму закону Кирхгофа, геометрическая сумма э. д. с. равна сумме падений напряжений в сопротивлении цепи: $\vec{U}_1 + \vec{E}_1 + \vec{E}_{s1} = I_0 r_1$.

Записав $\vec{E}_{s1} = -j I_0 X_1$ (X_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки), уравнению напряжений первичной обмотки трансформатора можно придать следующий вид: $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 - \vec{E}_{s1} + I_0 r_1$ или $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + I_0 r_1 + j I_0 X_1$.

На рис. 11.4, а изображена векторная диаграмма трансформатора при х.х. По горизонтальной оси направлен вектор амплитуды основного магнитного потока Φ_m , который индуцирует в первичной и вторичной обмотках э. д. с. E_1 и E_2 , отстающие от магнитного потока по фазе на четверть периода. Поэтому действующие значения э. д. с. обмоток трансформатора изображены векторами, повернутыми в сторону отставания (по часовой стрелке) относительно вектора магнитного потока на четверть периода. При построении векторной диаграммы предполагалось, что трансформатор, повышающий и э. д. с. вторичной обмотки больше, чем э. д. с. первичной ($E_2 > E_1$). Для понижающего трансформатора наоборот:

$E_1 > E_2$. Ток х. х., возбуждающий магнитный поток, изображен вектором I_0 , повернутым в сторону опережения относительно вектора магнитного потока на угол α , называемый *углом гистерезисного опережения* или *углом магнитного запаздывания*. Обычно этот угол мал и составляет несколько градусов. Основной магнитный поток, магнитные линии которого замыкаются через сталь магнитопровода, отстает на угол α от тока за счет потерь в стали на гистерезис и на вихревые токи. Поток рассеяния Φ_{s1} , магнитные линии которого замыкаются через немагнитную среду, совпадает по фазе с вектором тока I_0 , его создающим. Э. д. с. рассеяния отстает от потока рассеяния на четверть периода и показана вектором $E_{s1} = -jI_0X_1$, повернутым относительно вектора Φ_{s1} , на $\frac{\pi}{2}$ в сторо-

ну отставания. Вектор приложенного напряжения U_1 определится как геометрическая сумма трех векторов, стоящих в правой части уравнения равновесия э. д. с. Для этого из начальной точки диаграммы 0 строим вектор $-\dot{E}_1$, равный и противоположно направленный вектору э. д. с. первичной обмотки $\dot{E}_1$. Из конца вектора $-\dot{E}_1$ строим вектор $-\dot{E}_{s1} = +jI_0X_1$, равный и противоположный вектору $\dot{E}_{s1}$. Из конца вектора $-\dot{E}_{s1}$ строим вектор I_0r_1 , параллельный вектору тока х. х. Начало вектора $-\dot{E}_1$ и конец вектора I_0r_1 соединим вектором $\dot{U}_1$, представляющим собой геометрическую сумму векторов $-\dot{E}_1$, $-\dot{E}_{s1}$ и I_0r_1 . Следует иметь в виду, что векторная диаграмма изображена в искаженном масштабе. В действительности векторы I_0r_1 и $\dot{E}_{s1}$ очень малы по сравнению с векторами $\dot{U}_1$ и $-\dot{E}_1$. Поэтому при изображении диаграммы в масштабе векторы $\dot{U}_1$ и $-\dot{E}_1$ будут близки к совпадению.

Первичная обмотка трансформатора помимо активного сопротивления r_1 имеет индуктивное X_1 . Полное сопротивление этой обмотки $z = \sqrt{X_1^2 + r_1^2}$.

Вектор $-\dot{E}_1$ можно представить произведением тока I_0 на некоторое сопротивление z_0 . Это сопротивление непостоянно и содержит как индуктивное X_0 , так и активное сопротивление r_0 , так как угол между векторами $-\dot{E}_1$ и I_0 больше нуля, но меньше 90° . Таким образом, $-\dot{E}_1 = I_0z_0$.

Так как ток I_0 равен геометрической сумме активной I_a и реактивной I_μ составляющей, то сопротивление z_0 может быть представлено в виде двух параллельных ветвей, одна из которых содержит активное сопротивление r_0 , через которое протекает ток I_a , а другая — реактивное X_0 , через которое протекает ток I_μ .

Уравнение напряжений первичной обмотки с учетом приведенных выше обозначений примет следующий вид: $\dot{U}_1 = I_0|z_1 + z_0|$, т. е. трансформатор при х. х. может быть представлен эквивалентной схемой, состоящей из двух последовательно включенных сопротивлений z_1 и z_0 , как изображено на рис. 11.4, б. На эквивалентной схеме индуктивное сопротивление X_0 учитывает действие основного магнитного потока, а активное сопротивление r_0 эквивалентно потерям в стали магнитопровода, т. е. мощность, выделяющаяся

в этом сопротивлении $I_a^2 r_0 = P_c$. Так как основной магнитный поток в магнитопроводе много больше потока рассеяния, то $X_0 \gg X_1$, $r_0 \gg r_1$, поэтому полное сопротивление $z_0 \gg z_1$.

Полное сопротивление х. х. $z_0 = (r_0 X_0^2 + j r_0^2 X_0) / (r_0^2 + X_0^2)$. По данным опыта х. х. полное, активное и реактивное сопротивления будут: $z_0 = U_1 / I_0$; $r_0 = P_0 / I_a^2$; $X_0 = U_1 / I_\mu$, где $I_a = I_0 \cos \varphi$; $I_\mu = I_0 \sin \varphi$; $\cos \varphi = P_0 / (U_1 I_0)$. В этих выражениях P_0 ; U_1 ; I_0 — соответственно мощность, напряжение и ток, измеренные при опыте х. х.

Для трехфазного трансформатора векторная диаграмма и эквивалентная схема изображаются для одной фазы и имеют такой же вид, как векторная диаграмма и эквивалентная схема однофазного трансформатора.

Глава 12

РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТРАНСФОРМАТОРА

§ 12.1. Равновесие намагничивающих сил обмоток трансформатора

При работе трансформатора на какой-либо приемник электрической энергии по его первичной обмотке протекает ток I_1 , по вторичной обмотке — I_2 (рис. 12.1).

Для первичной обмотки уравнение напряжений запишется в виде

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + I_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1. \quad (12.1)$$

Практически падение напряжения в полном сопротивлении первичной обмотки $I_1 z_1$ очень мало в сравнении с приложенным напряжением, поэтому можно считать, что приложенное напряжение уравновешивается э. д. с. первичной обмотки, т. е. $U_1 \approx -E_1$. Следовательно, при неизменном напряжении сети будет неизменна

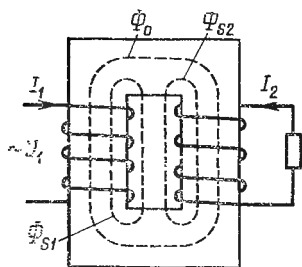


Рис. 12.1. Схема работы трансформатора при нагрузке

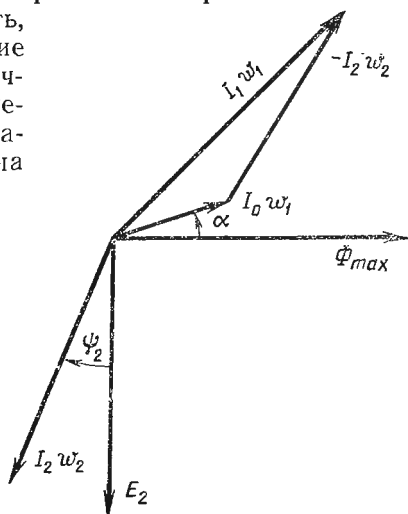


Рис. 12.2. Векторная диаграмма н. с. обмоток трансформатора

как э. д. с. E_1 , так и амплитуда магнитного потока $\Phi_{\max}$ при любой нагрузке.

При х. х. намагничивающая сила $I_0\omega_1$ создает основной магнитный поток трансформатора $\Phi_{\max}$, который индуцирует э. д. с. E_1 в первичной и E_2 во вторичной обмотках. Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии, то по вторичной обмотке будет протекать ток I_2 . Намагничивающая сила вторичной обмотки $I_2\omega_2$ направлена встречно потоку, ее создающему: стремится уменьшить магнитный поток $\Phi_{\max}$. Но при уменьшении потока $\Phi_{\max}$ уменьшится и E_1 , что ведет к увеличению тока первичной обмотки I_1 . Ток I_1 увеличивается до такой величины, при которой н. с. первичной обмотки $I_1\omega_1$ компенсирует размагничивающее действие н. с. вторичной обмотки. Таким образом, н. с. первичной обмотки создает неизменный, практически не зависящий от нагрузки магнитный поток в магнитопроводе трансформатора $\Phi_{\max}$ и компенсирует размагничивающее действие н. с. вторичной обмотки, что изображено на векторной диаграмме (рис. 12.2). По горизонтальной оси этой диаграммы отложен вектор основного магнитного потока $\Phi_{\max}$. Индуцируемая этим магнитным потоком э. д. с. вторичной обмотки E_2 показана вектором, повернутым относительно вектора $\Phi_{\max}$ на $\pi/2$ в сторону отставания. При активно-индуктивной нагрузке ток вторичной обмотки I_2 отстает по фазе от э. д. с. на некоторый угол ψ_2 , зависящий от соотношения активного и реактивного сопротивлений нагрузки. Вектор н. с. вторичной обмотки $I_2\omega_2$ совпадает по направлению с вектором I_2 . Вектор намагничивающей силы х. х. $I_0\omega_1$ повернут относительно вектора $\Phi_{\max}$ в сторону опережения на угол гистерезисного опережения α . Намагничивающая сила первичной обмотки $I_1\omega_1$ при нагрузке равна геометрической сумме векторов $I_0\omega_1$ и $-I_2\omega_2$. Диаграмма н. с. показывает, что любое изменение тока вторичной обмотки (нагрузки) вызывает соответствующее изменение тока и в первичной обмотке (увеличение тока вторичной обмотки в равной мере повышает ток первичной обмотки).

Таким образом, уравнение равновесия н. с. запишем в следующем виде:

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 = I_0\omega_1 \quad \text{или} \quad I_1 = I_0 + (-I_2'), \quad (12.2)$$

где $I_2' = I_2\omega_2/\omega_1 = I_2/k$.

§ 12.2. Векторная диаграмма и эквивалентная схема трансформатора при нагрузке

При построении векторных диаграмм и эквивалентных схем необходимо сравнивать величины, относящиеся к первичной и вторичной обмоткам, которые при коэффициенте трансформации, не равном единице, могут быть существенно различными. Для удобства построения вторичную обмотку трансформатора приводят к виткам первичной, т. е. условно полагают, что вместо вторичной обмотки с числом витков ω_2 имеется обмотка с числом витков ω_1 ,

равным числу витков первичной обмотки, но так, чтобы мощность, потери энергии и фазовые углы между электрическими величинами оставались после приведения трансформатора неизменными.

Э. д. с. вторичной обмотки трансформатора пропорциональна числу витков, следовательно, при изменении числа витков обмотки изменится и ее э. д. с.: $E_2' = E_2 \omega_1 / \omega_2 = E_2 k = E_1$. Напряжение приведенной обмотки $U_2' = k U_2$. Приведенное значение вторичного тока найдем из условия постоянства полной мощности, т. е. полная мощ-

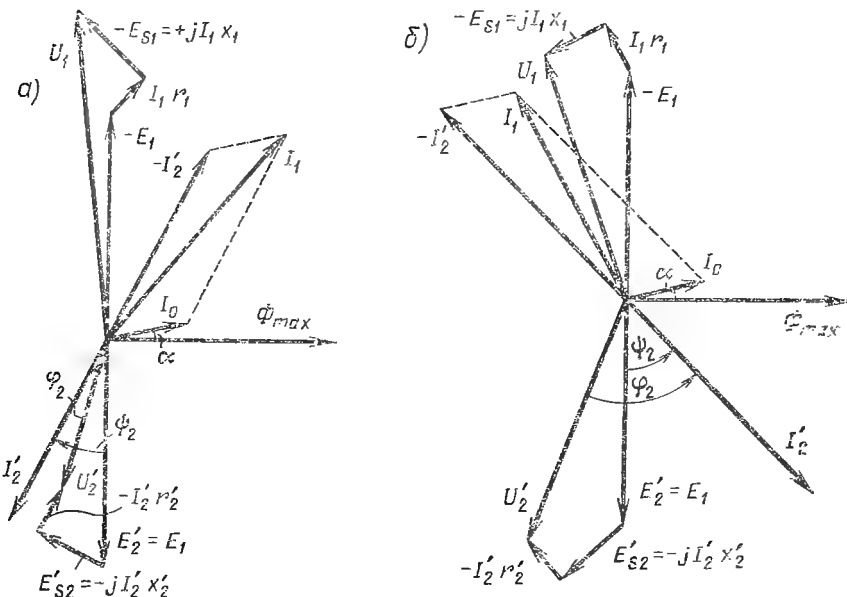


Рис. 12.3. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

ность приведенной вторичной обмотки должна оставаться равной полной мощности действительной вторичной обмотки: $U_2' I_2' = U_2 I_2$, откуда $I_2' = I_2 U_2 / U_2' = I_2 / k$. Активное сопротивление приведенной вторичной обмотки трансформатора найдем из условия постоянства потерь в меди при приведении вторичной обмотки: $I_2'^2 r_2' = I_2^2 r_2$, откуда $r_2' = (I_2 / I_2')^2 r_2 = k^2 r_2$. Индуктивное сопротивление, так же как и индуктивность, пропорциональна квадрату числа витков, следовательно, индуктивное сопротивление приведенной вторичной обмотки $X_2' = k^2 X_2$.

После приведения вторичной обмотки трансформатора к виткам первичной мы можем перейти к построению векторной диаграммы. На рис. 12.3 показана векторная диаграмма для активно-индуктивной (а) и для активно-емкостной (б) нагрузок. В сторону опережения относительно вектора основного потока трансформатора Φ_{max} на угол α построен вектор тока I_0 , а в сторону отставания на угол $\pi/2$ — векторы э. д. с. первичной и приведенной вторичной

обмоток $E_1 = E_2'$. В сторону отстаивания при индуктивном характере нагрузки (а) и в сторону опережения при емкостном характере нагрузки (б) на угол ψ_2 строим вектор приведенного вторичного тока I_2' .

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора при нагрузке равно сумме э. д. с. вторичной обмотки минус падение напряжения в активном сопротивлении этой обмотки, т. е. уравнение напряжений для вторичной обмотки трансформатора имеет следующий вид:

$$U_2 = E_2 + E_{s2} - I_2 r_2 = E_2 - I_2 r_2 - j I_2 X_2, \quad (12.3)$$

где E_2 — э. д. с., индуцированная во вторичной обмотке основным магнитным потоком трансформатора; E_{s2} — э. д. с. от потока рассеяния вторичной обмотки; X_2 — индуктивное сопротивление этой обмотки.

При нагрузке трансформатора током вторичной обмотки будет создан поток рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через воздух и пронизывают витки только вторичной обмотки. После приведения вторичной обмотки к виткам первичной мы запишем это уравнение в следующем виде:

$$U_2' = E_2' + E_{s2}' - I_2' r_2' = E_2' - I_2' r_2' - j I_2' X_2'. \quad (12.4)$$

Следовательно, для определения вектора напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора при нагрузке из конца вектора э. д. с. E_2' строим вектор $E_{s2}' = -j I_2' X_2'$, отстающий от вектора тока I_2' на $\pi/2$, и затем вектор $-I_2' r_2'$, параллельный и противоположно направленный вектору тока I_2' . Геометрическая сумма этих трех построенных векторов дает приведенное вторичное напряжение трансформатора U_2' .

Для определения тока первичной обмотки нам нужно, согласно уравнению равновесия н. с., построить геометрическую сумму векторов тока I_0 и приведенного тока вторичной обмотки с обратным знаком $-I_2'$. Для определения первичного напряжения воспользуемся уравнением равновесия напряжений обмотки: $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + \dot{I}_1 r_1$.

Строим вектор $-\dot{E}_1$, равный и противоположно направленный вектору $\dot{E}_1$. Из конца вектора $-\dot{E}_1$ строим вектор $-\dot{E}_{s1} = +j \dot{I}_1 X_1$, повернутый относительно вектора тока $\dot{I}_1$ на $\pi/2$ в сторону опережения, и затем вектор $\dot{I}_1 r_1$, параллельный вектору тока $\dot{I}_1$. Геометрическая сумма трех построенных нами векторов — вектор приложенного напряжения $\dot{U}_1$.

Из векторных диаграмм видно, что вторичное напряжение зависит от величины тока нагрузки трансформатора I_2 и от характера нагрузки, т. е. от угла φ_2 . При индуктивном характере нагрузки вторичное напряжение по абсолютной величине меньше, чем э. д. с. ($U_2' < E_2'$), — понижение напряжения; при емкостном характере нагрузки вторичное напряжение по абсолютной величине больше, чем э. д. с. ($U_2' > E_2'$), — повышение напряжения.

Так же, как и в случае х. х. трансформатора, для рабочего режима мы можем построить эквивалентную схему (рис. 12.4).

Э. д. с. рассеяния первичной обмотки с обратным знаком $-E_{s1}$ мы выше представили в виде падения напряжения в индуктивном сопротивлении X_1 , обусловленном потоком рассеяния Φ_{s1} , т. е. $-E_{s1} = jI_1X_1$. Э. д. с. рассеяния вторичной обмотки $E_{s2} = -jI_2X_2$ представим в виде падения напряжения на индуктивном сопротивлении X_2 , обусловленном потоком рассеяния Φ_{s2} . После приведения вторичной обмотки к первичной, получим $E_{s2}' = -jI_2'X_2'$. Тогда уравнениям равновесия э. д. с. для первичной и вторичной обмоток трансформатора можем придать следующий вид: $\vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + I_1z_1$ и $\vec{U}_2' = \vec{E}_2' - I_2'z_2'$, где $z_1 = \sqrt{r_1^2 + X_1^2}$ и $z_2' = \sqrt{(r_2')^2 + (X_2')^2}$ — полные сопротивления первичной и приведенной вторичной обмоток трансформатора.

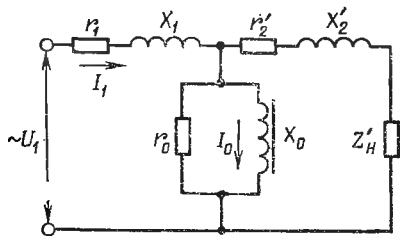


Рис. 12.4. Эквивалентная схема трансформатора при нагрузке

Введем обозначение: $\vec{E}_1 = \vec{E}_2' = -I_0z_0$, где I_0 — вектор тока х. х.; z_0 — полное сопротивление трансформатора при х. х.

Напряжение вторичной обмотки трансформатора при нагрузке $\vec{U}_2' = I_2'z_H'$, где z_H' — полное приведенное сопротивление внешней нагрузки.

Из уравнения равновесия н. с. имеем: $I_2' = I_0 - I_1$. Уравнение равновесия э. д. с. для вторичной обмотки трансформатора запишем в измененном виде: $(I_0 - I_1)z_H' = -I_0z_0 + (I_1 - I_0)z_2'$. Отсюда ток х. х. $I_0 = I_1(z_2' + z_H') / (z_0 + z_2' + z_H')$.

Подставив I_0 в уравнение равновесия э. д. с. для первичной обмотки, получим $\vec{U}_1 = I_0z_0 + I_1z_1 = I_1[z_0(z_2' + z_H') / (z_0 + z_2' + z_H') + z_1]$. Откуда эквивалентное сопротивление трансформатора

$$z_s = z_1 + z_0(z_2' + z_H') / (z_0 + z_2' + z_H') \quad (12.5)$$

представляет собой два последовательно включенных сопротивления, из которых первое — полное сопротивление первичной обмотки трансформатора, второе — параллельное соединение двух сопротивлений: сопротивления х. х. трансформатора и последовательное соединение приведенных полных сопротивлений вторичной обмотки трансформатора и нагрузки.

Ток I_0 — малая величина по сравнению с номинальным током первичной обмотки трансформатора. Кроме того, ток I_0 и ток нагрузки I_2' не совпадают по фазе. Так, например, при активной нагрузке ток I_2' будет активным и окажется близким к совпадению с э. д. с., тогда как ток х. х. почти чисто реактивный и близок к совпадению с основным магнитным потоком по фазе. Поэтому ток первичной обмотки численно незначительно отличается от приведенного тока вторичной обмотки: $I_1 \approx -I_2'$.

Если пренебречь током х. х., то упрощенная эквивалентная

схема трансформатора при нагрузке будет более простой (рис. 12.5, а). Для этой схемы можно ввести следующие обозначения:

$$r_1 + r'_2 = r_K; \quad X_1 + X'_2 = X_K; \quad z_K = \sqrt{r_K^2 + X_K^2},$$

где z_K , r_K и X_K — соответственно полное, активное и реактивное сопротивление к. з. трансформатора (см. § 12.3). На рис. 12.5, б показана видоизмененная эквивалентная схема трансформатора при нагрузке.

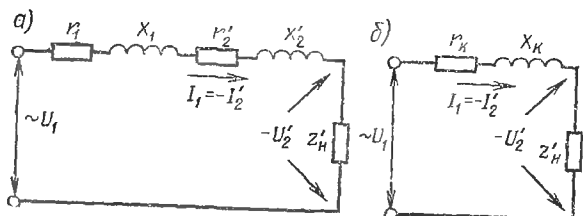
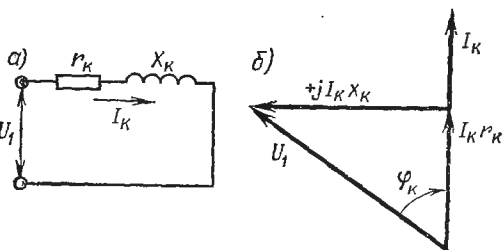


Рис. 12.5. Упрощенная (а) и видоизмененная (б) эквивалентные схемы трансформатора

§ 12.3. Опыт короткого замыкания трансформатора

Короткие замыкания в электрических установках возникают обычно вследствие каких-либо неисправностей в сетях (при механическом повреждении изоляции, при ее электрическом пробое в результате перенапряжений и др.) или при ошибочных действиях эксплуатационного персонала. Для трансформатора к. з. представляет собой серьезную опасность, так как при этом возникают очень большие токи. При к. з. зажимов вторичной обмотки сопротивление нагрузки $z_H = 0$, и следовательно, напряжение на зажимах вторичной обмотки $U_2 = 0$. Таким образом, напряжение U_1 , приложенное к первичной обмотке, будет уравновешено падением напряжения в полных сопротивлениях первичной и вторичной обмоток: $z_K = z_1 + z'_2$. Эквивалентная схема для одной фазы трансформатора при к. з. изображена на рис. 12.6, а.

Рис. 12.6. Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора при к. з.



Уравнение равновесия э. д. с. первичной обмотки трансформатора при к. з. вторичной обмотки запишется в следующем виде: $U_1 = I_K z_K$, где I_K — ток к. з.

На рис. 12.6, б построена векторная диаграмма для одной фазы трансформатора при к. з. Вертикально вверх направлен вектор тока к. з. I_K , параллельно ему — вектор напряжения в активном со-

противления к. з. $I_K r_K$. На $\pi/2$ повернут относительно вектора тока в сторону опережения вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении к. з. трансформатора $jI_K X_K$. Геометрическая сумма векторов $I_K r_K$ и $jI_K X_K$ дает вектор приложенного к первичной обмотке напряжения $\vec{U}_1$, который оказался повернутым относительно вектора тока I_K в сторону опережения на угол к. з. φ_K . Этот угол зависит от соотношения сопротивлений X_K и r_K . Чем больше индуктивное сопротивление X_K и меньше активное r_K , тем большим будет угол φ_K . Таким образом, сила тока к. з. трансформатора $I_K = U_1/z_K$.

Так как падение напряжения в полном сопротивлении обмоток трансформатора при номинальном токе $I_{\text{ном}}$ составляет несколько процентов от номинального напряжения, т. е. $I_{\text{ном}} z_K \approx (0,05 \div 0,07) U_1$, то ток I_K окажется больше номинального тока во столько раз, во сколько номинальное напряжение больше падения напряжения в полном сопротивлении обмоток при номинальном токе:

$$I_K/I_{\text{ном}} = U_1/(I_{\text{ном}} z_K) = U_1/[(0,05 \div 0,07) U_1] = 20 \div 14.$$

Отношение $I_K/I_{\text{ном}} = 100/U_K$ называют *кратностью тока короткого замыкания*. Потери в проводах обмоток трансформатора пропорциональны току во второй степени ($P_M = I^2 r_K$), так что в случае, когда ток к. з. окажется, например, в 20 раз больше номинального тока, потери в проводах обмоток будут в 400 раз больше (если не учитывать увеличения сопротивления обмоток от нагрева). Выделение большой мощности в проводах обмоток вызывает резкое повышение их температуры, вследствие которого возможно нарушение целостности изоляции и выход трансформатора из строя. Поэтому все трансформаторы снабжены достаточно быстродействующей защитой, которая отключает трансформатор в случае его к. з., которое очень опасно. Если время, в течение которого трансформатор находится в режиме к. з., будет мало, то обмотки его не успевают нагреваться до температуры, опасной для изоляции. Как известно, между проводами, обтекаемыми током, возникает механическое взаимодействие. Если в двух параллельных проводах протекают токи, направленные в одну и ту же сторону, то эти провода притягиваются друг к другу, а если направления токов противоположны, то проводники отталкиваются.

В трансформаторе имеется очень много параллельных друг другу витков, каждый из которых можно рассматривать как отдельный провод. В витках какой-либо обмотки (первичной или вторичной) протекают токи одинакового направления, так что все витки одной обмотки взаимно притягиваются. Намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток имеют встречное направление, поэтому обмотки стремятся оттолкнуться одна от другой. Механические силы, действующие на обмотки, зависят от конструкции обмоток, размещения витков и токов, протекающих в обмотках. В концентрических симметричных обмотках силы, действующие на обмотки, направлены перпендикулярно оси катушек (рис. 12.7, а); в дисковых чередующихся обмотках силы направлены параллельно

оси катушек (рис. 12.7, б). Так как силы, действующие на провод с током, зависят от произведения токов в проводах, то и силы F , действующие на обмотки трансформаторов, при к. з. будут во много раз большими сил, которые возникают при номинальной нагрузке. Под действием очень больших механических сил обмотки трансформатора деформируются настолько, что может быть нарушена изоляция и резко уменьшена их электрическая прочность. Поэтому конструкция обмоток должна быть рассчитана на такую механическую прочность, которая противостояла бы силам, возникающим в первый момент от мгновенных токов I_K' , превышающих установившиеся токи I_K примерно в два раза ($I_K' = 2I_K$).

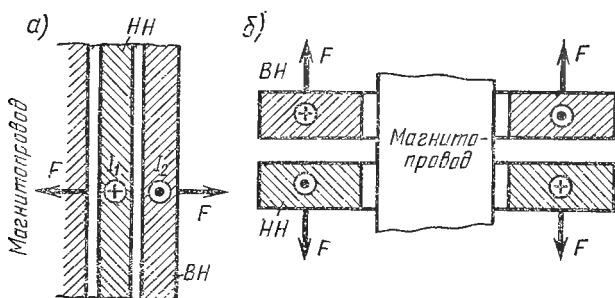


Рис. 12.7. Направление сил, действующих на концентрические симметричные (а) и дисковые (б) обмотки трансформатора

Опыт к. з. производится при значительно пониженном напряжении и является вторым предельным режимом работы трансформатора, который наряду с опытом х. х. позволяет определить параметры трансформатора при любой нагрузке. При опыте к. з. вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко, а к первичной подводят такое пониженное U_K , при котором в обмотках трансформатора протекают номинальные токи. Это напряжение называют *напряжением короткого замыкания*, измеряется оно в процентах от номинального: $u_K = \frac{U_K}{U_{ном}} 100\%$.

Согласно ГОСТ 11677—75 напряжение к. з. $u_K = 5,5 \div 10,5\%$. При столь малом напряжении магнитный поток будет незначительным, а следовательно, мал и намагничивающий ток $I_{0K} = 0$. Поэтому мы можем считать, что н. с. первичной обмотки трансформатора идет лишь на компенсацию н. с. вторичной обмотки. Пренебрегая намагничивающим током при опыте к. з., ток первичной обмотки равен приведенному току вторичной обмотки с обратным знаком: $I_1 = -I_2'$.

При опыте к. з. по обмоткам трансформатора (см. рис. 12.6, а) протекают номинальные токи и приложенное к первичной обмотке напряжение:

$$\begin{aligned} \dot{U}_K &= \dot{I}_{\text{ном}} z_K = \dot{I}_{\text{ном}} r_K + j \dot{I}_{\text{ном}} X_K = \dot{U}_a + \dot{U}_x; \quad \dot{U}_a = \dot{I}_{\text{ном}} r_K; \quad \dot{U}_x = \\ &= j \dot{I}_{\text{ном}} X_K, \end{aligned} \quad (12.6)$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток первичной обмотки; z_K , r_K , X_K — соответственно полное, активное и реактивное сопротивления к. з.; $\dot{U}_a$, $\dot{U}_x$ — соответственно активная и реактивная составляющие напряжения к. з. $U_K = \sqrt{U_a^2 + U_x^2}$.

На основании (12.6) может быть построена векторная диаграмма, которая примет вид треугольника напряжений (см. рис. 12.6, б).

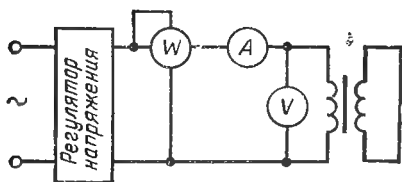


Рис. 12.8. Схема опыта к. з. трансформатора

Такую векторную диаграмму называют *треугольником короткого замыкания*, а угол φ_K — *углом короткого замыкания*. Этот угол $\varphi_K = \arctg(X_K/r_K) = \arctg(U_x/U_a)$ зависит от соотношения активного и реактивного сопротивлений к. з.

При опыте к. з. трансформатора для понижения напряжения используют индукционный регулятор, трансформатор и др. В цепь первичной обмотки включают амперметр A , вольтметр V и ваттметр W (рис. 12.8). Для большей точности измерения первичной обмоткой является обмотка высшего напряжения (ВН). Так как напряжение к. з. составляет всего несколько процентов от номинального, то для обмотки ВН оно будет представлять собой большую величину и может быть изменено с большей точностью, чем в случае, когда при опыте к. з. первичной обмоткой будет обмотка НН. Так же для большей точности измерения вторичная обмотка должна быть замкнута накоротко шиной с малым сопротивлением. Включение амперметров и других каких-либо приборов в цепь вторичной обмотки недопустимо, так как это снижает точность измерений.

Опыт к. з. позволяет определить напряжение U_K , потери в обмотках трансформатора P_M и сопротивления к. з. трансформатора z_K , r_K и X_K .

Напряжение U_K определится показанием вольтметра при номинальном токе трансформатора, потери в обмотках P_M (потери в меди) — показанием ваттметра. При опыте к. з. полезная мощность трансформатора равна нулю, а потери в стали ничтожно малы, так как мал магнитный поток в сердечнике. Поэтому мощность, потребляемая трансформатором при опыте к. з., расходуется на нагревание проводов обмоток: $P_K = P_M = I_{\text{ном}}^2 r_K$, где $I_{\text{ном}}$ — номи-

нальный ток первичной обмотки. Сопротивления к. з.: активное $r_k =$

$$= P_k / I_{\text{ном}}^2, \text{ полное } z_k = U_k / I_{\text{ном}}, \text{ индуктивное } X_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Если опыт к. з. производят при «холодном» (неработающем) трансформаторе, то параметры к. з. надо привести к рабочей температуре 75°C , при изменении которой меняются активное сопротивление и потери в обмотках. Таким образом, приведенные к температуре 75° активное сопротивление $r_{k75} = r_k (75 + 235) / (T + 235)$, где T — температура обмотки при опыте к. з.; мощность потерь в обмотках $P_{k75} = P_k (75 + 235) / (T + 235)$; полное сопротивление

$$z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + X_k^2}.$$

При температуре 75°C напряжение короткого замыкания $u_{k75} =$
 $= \frac{I_{\text{ном}} z_{k75}}{U_{\text{ном}}} 100\%$, его активная и реактивная составляющие:

$$u_{a75} = \frac{I_{\text{ном}} r_{k75}}{U_{\text{ном}}} 100\% = \frac{P_k (\text{Вт})}{10 S_{\text{ном}} (\text{кВ} \cdot \text{А})} \% ; u_x = \frac{I_{\text{ном}} X_k}{U_{\text{ном}}} 100\%.$$

При испытаниях трехфазного трансформатора во всех выражениях должны быть подставлены фазные значения токов, напряжений и мощность для одной фазы.

Соотношение активных и реактивных сопротивлений и составляющих напряжения к. з. зависит от номинальной мощности трансформатора. У трансформаторов малой мощности (до нескольких кВ·А) активное сопротивление больше реактивного ($r_k > X_k$) и активная составляющая напряжения к. з. больше реактивной составляющей ($u_a > u_x$). Для трансформаторов больших мощностей (сотни и тысячи кВ·А) имеет место обратное соотношение: $r_k < X_k$ и $u_a < u_x$.

С увеличением номинальной мощности увеличиваются номинальные токи, а следовательно, и поперечные сечения проводов обмоток. Поэтому активное сопротивление, обратно пропорциональное сечению проводов, уменьшается так же, как и активная составляющая напряжения к. з. Реактивная составляющая напряжения к. з. увеличивается с увеличением мощности трансформатора. Это объясняется тем, что реактивное сопротивление обмоток трансформатора обусловлено потоками рассеяния, магнитные линии которых замыкаются по немагнитной среде и сцеплены с проводами той обмотки, токами которой они создаются. Чем больше номинальная мощность трансформатора, тем больше поперечное сечение проводов обмоток и объем, занимаемый обмотками. Поэтому увеличиваются как потоки рассеяния, так и реактивная составляющая напряжения к. з. Реактивная составляющая напряжения к. з. зависит также от рабочих напряжений обмоток, повышается с увеличением напряжения. Так, например, для трансформатора с номинальной мощностью 180 кВ·А при напряжении первичной и вторичной обмоток 35 и 3,15 кВ реактивная составляющая напряжения к. з. $u_x = 3,8\%$, а при напряжении обмоток 35 и 10,5 кВ — $u_x = 6\%$. У трансформатора номинальной мощности 20 000 кВ·А

при напряжении обмоток 38,5 и 11 кВ $u_x = 7,9\%$, а при напряжении обмоток 121 и 38,5 кВ $u_x = 10,4\%$.

При повышении рабочих напряжений обмоток трансформатора увеличиваются изоляционные промежутки, потоки рассеяния и реактивные сопротивления обмоток.

§ 12.4. Процентное понижение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке

Изменение вторичного напряжения при нагрузке трансформатора характеризуется процентным понижением напряжения:

$$\Delta u = \frac{(U_{20} - U_2)}{U_{20}} 100\% = \frac{(U'_{20} - U'_2)}{U'_{20}} 100\% = \frac{(U'_1 - U'_2)}{U_1} 100\%, \quad (12.7)$$

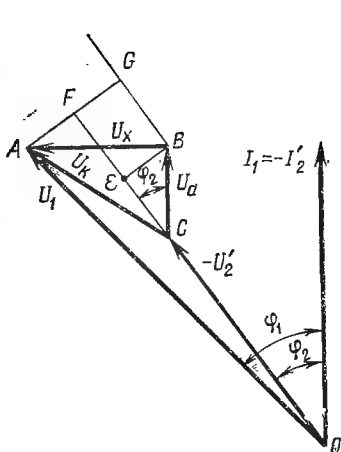


Рис. 12.9. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора при нагрузке

Вектор номинального тока первичной обмотки трансформатора $I_1 = -I_2'$ направлен в положительном направлении оси ординат, в сторону опережения на угол φ_2 строим вектор $-U_2'$ (в данном случае считаем, что нагрузка индуктивного характера). Вектор напряжения первичной обмотки U_1 определится геометрической суммой векторов: $-U_2'$, $U_a = I_1 r_K$ и $U_x = j I_1 X_K$.

Построим векторную диаграмму так, чтобы вектор U_1 имел 100 линейных единиц, тогда $\Delta u = U_1 - U_2'$, т. е. изменение вторичного напряжения в % определяется числом линейных единиц разности модулей векторов U_1 и $-U_2'$.

Практически угол между векторами U_1 и $-U_2'$ крайне мал, т. е. $\varphi_1 - \varphi_2 \approx 0$, следовательно, разность модулей векторов U_1 и $-U_2'$ можем принять равной модулю геометрической разности этих векторов: $U_1 - U_2' \approx |\vec{U}_1 - (-\vec{U}_2')|$.

где U_{20} и U_2 — напряжения вторичной обмотки при х. х. и при нагрузке соответственно; U'_{20} и U'_2 — те же напряжения после приведения вторичной обмотки к виткам первичной; U_1 — напряжение первичной обмотки.

Для упрощенной эквивалентной схемы (см. рис. 12.5, б) напряжение и ток первичной обмотки $\vec{U}_1 = -\vec{U}_2' + I_1 r_K + j I_1 X_K$ и $I_1 = -I_2'$, при номинальном режиме трансформатора

$$\vec{U}_1 = -\vec{U}_2' + \vec{U}_a + \vec{U}_x, \quad (12.8)$$

где $U_a = I_{\text{ном}} r_K$ и $U_x = j I_{\text{ном}} X_K$ — активная и реактивная составляющие напряжения к. з.

Для определения процентного понижения вторичного напряжения построим упрощенную векторную диаграмму трансформатора (рис. 12.9).

Для определения разности $U_1 - U_2'$ на векторной диаграмме продолжим направление вектора $-U_2'$ и из точки A конца вектора U_1 проведем перпендикуляр AG к вектору U_2' . Точка G определена так, что отрезок GB параллелен CF , которым определяется разность $U_1 - U_2'$: $CF = CE + EF = CE + BG$. Из треугольника CBE находим отрезок $CE = CB \cos \varphi_2 = u_a \cos \varphi_2$, из треугольника ABG — отрезок $BG = AB \sin \varphi_2 = u_x \sin \varphi_2$.

Окончательно процентное изменение вторичного напряжения (%)

$$\Delta u = u_a \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2, \quad (12.9)$$

где u_a и u_x — активная и реактивная составляющие напряжения к.з., выраженные в % к номинальному.

Если учесть, что вектор $-U_2'$ не совпадает по направлению с вектором U_1 , то получим следующую формулу:

$$\Delta u = u_a \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2 + (u_a \sin \varphi_2 - u_x \cos \varphi_2)^2 / 200.$$

Практически третье слагаемое здесь крайне мало. Из этой формулы видно, что процентное изменение вторичного напряжения зависит от величины и характера нагрузки.

Для номинального тока напряжение к.з. $u_k = \frac{I_{\text{ном}} z_k}{U_{\text{ном}}} 100\%$, а его составляющие

$$u_a = \frac{I_{\text{ном}} r_k}{U_{\text{ном}}} 100\%; \quad u_x = \frac{I_{\text{ном}} x_k}{U_{\text{ном}}} 100\%.$$

Для определения Δu при любом значении тока введем коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению тока выбранной нагрузки к номинальному: $\beta = I_1 / I_{\text{ном}}$.

Следовательно, при любом значении тока I_1 процентное изменение вторичного напряжения

$$\Delta u = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2), \quad (12.10)$$

т. е. Δu пропорционально току I_1 .

Это выражение показывает, что Δu в значительной мере зависит от характера нагрузки, и согласно (12.9) на рис. 12.10 построена зависимость Δu от φ_2 .

Из векторной диаграммы, построенной на рис. 12.9, можно видеть, что Δu является проекцией вектора напряжения к.з. $U_k = AC$ на направление вектора U_1 . При изменении характера нагрузки трансформатора, т. е. угла φ_2 , треугольник к.з. ABC различным образом ориентируется относительно неизменного вектора U_1 , следовательно, и неодинаковой при различных характерах нагрузки будет проекция вектора U_k на направление вектора U_1 . Легко видеть, что наибольшее значение Δu будет при таком характере нагрузки, при котором вектор U_k совпадает по направлению с U_1 , т. е. при $\varphi_2 = \varphi_k$.

Внешняя характеристика трансформатора — зависимость вторичного напряжения от тока, при различных характерах нагрузки

изображена на рис. 12.11. При нагрузке напряжение вторичной обмотки трансформатора $U_2 = U_{20}(1 - \Delta u/100)$.

Активная u_a и реактивная u_x составляющие напряжения к.з. определяются из опыта к.з. трансформатора. Задаваясь различными значениями β и $\cos \varphi_2$, можно определить Δu и U_2 для любой нагрузки трансформатора, не подвергая его непосредственным испытаниям.

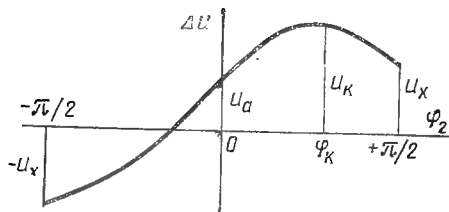


Рис. 12.10. Зависимость процентного понижения вторичного напряжения трансформатора от характера нагрузки

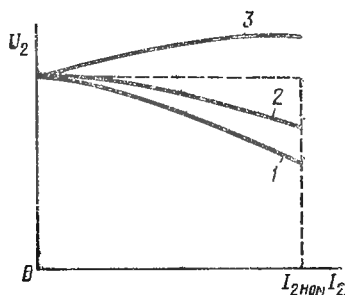


Рис. 12.11. Внешняя характеристика трансформатора при различных характерах нагрузки:
1 — активно-индуктивная; 2 — активная; 3 — активно-емкостная.

§ 12.5. Коэффициент полезного действия трансформатора

В соответствии с законом сохранения энергии потребляемая трансформатором мощность P_1 больше мощности, отданной им в нагрузку P_2 , так как при работе трансформатора (так же, как и любого преобразователя энергии) часть преобразуемой им электрической энергии неизбежно теряется. При работе трансформатора на какую-либо нагрузку из питающей сети помимо полезной мощности P_2 потребляется мощность, идущая на покрытие потерь в стали магнитопровода P_c и в проводах обмоток (потери в меди) P_m . Потери в стали магнитопровода на гистерезис и на вихревые токи зависят от частоты тока питающей сети и от магнитной индукции. Так как при работе трансформатора частота тока сети и амплитуда магнитной индукции неизменны (при условии постоянства приложенного напряжения), то потери в стали постоянны, не зависят от нагрузки трансформатора и равны потерям х.х.: $P_c = P_0$. Эти потери определяются из опыта х.х. трансформатора.

Коэффициент полезного действия трансформатора представляет собой отношение полезной мощности, отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности, потребляемой им из первичной сети: $\eta = P_2/P_1$, или $\eta = P_2 100\%/P_1$. Практически к.п.д. трансформаторов очень высок. Так, для трансформаторов малых мощностей (до 1000 В·А) $\eta = 85 \div 95\%$, для трансформаторов больших мощностей $\eta = 95 \div 99,5\%$.

При любой величине и характере нагрузки трансформатора его полезная мощность

$$P_2 = \beta P_{2\text{ном}} \cos \varphi_2,$$

где $\beta = I_1/I_{\text{ном}}$ — коэффициент нагрузки трансформатора (I_1 — ток первичной обмотки при выбранной нагрузке; $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток первичной обмотки); $P_{2\text{ном}}$ — номинальная мощность трансформатора.

Подведенная мощность определяется как сумма полезной мощности трансформатора и мощности потерь: $P_1 = P_2 + \Sigma P = P_2 + P_0 + P_M$. Потери в меди P_M зависят от тока (от нагрузки) и являются потерями переменными. Эти потери пропорциональны квадрату тока, т. е. $P_M = \beta^2 P_{M\text{ном}}$, где $P_{M\text{ном}}$ — потери в меди при номинальном токе.

В зависимости от коэффициента нагрузки β к. п. д. трансформатора

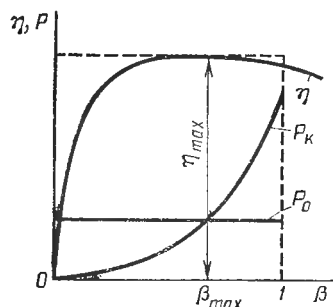


Рис. 12.12. Зависимость к. п. д. и потерь трансформатора от коэффициента нагрузки

$$\eta = P_2 / (P_2 + P_0 + P_M) = \beta P_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 / (\beta P_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{M\text{ном}}). \quad (12.11)$$

Однако при определении к. п. д. удобнее пользоваться несколько видоизмененным выражением:

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - (P_0 + P_M) / (P_2 + P_0 + P_M) = \\ &= 1 - (P_0 + P_{M\text{ном}} \beta^2) / (\beta P_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{M\text{ном}}). \end{aligned}$$

На рис. 12.12 построены зависимости η , P_0 и P_M от коэффициента нагрузки β , откуда видно, что зависимость $\eta = f(\beta)$ имеет максимум. Коэффициент нагрузки, соответствующий наибольшему значению к. п. д. β_m , определится согласно общему правилу об экстремумах функций. Продифференцировав зависимость $\eta = f(\beta)$ и приравняв производную нулю, получим

$$[\beta_{\text{max}} P_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta_{\text{max}}^2 P_{M\text{ном}}] - \beta_{\text{max}} [P_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 + 2\beta_{\text{max}} P_{M\text{ном}}] = 0,$$

откуда

$$P_0 = \beta_{\text{max}}^2 P_{M\text{ном}} \text{ и } \beta_{\text{max}} = \sqrt{P_0 / P_{M\text{ном}}}. \quad (12.12)$$

Следовательно, наибольший к. п. д. будет при такой нагрузке, при которой постоянные потери равны потерям переменным ($P_0 = P_M$). Потери постоянные — это потери в стали, зависящие от квадрата магнитной индукции ($P_0 \sim B^2$). Потери переменные — это потери в меди обмоток трансформатора, зависящие от квадрата плотности тока ($P_M \sim j^2$). Выбирая различные значения электромагнитных нагрузок трансформатора (j и B), можно изменять со-

отношение потерь постоянных и переменных. При этом будет меняться и коэффициент нагрузки $\beta_{\max}$, соответствующий наибольшему значению к. п. д.

Если трансформатор имеет номинальную нагрузку в течение всего времени работы, то желательно получить наибольший к. п. д. при номинальном токе ($\beta_{\max}=1$), что является обычным в трансформаторах малой мощности. Если же трансформатор работает в режимах частых и значительных недогрузок, то желательно получить наибольший к. п. д. при нагрузках трансформатора меньше номинальных ($\beta_{\max}<1$). В этом случае желательно иметь наибольший к. п. д. при такой нагрузке, на которую большую часть времени работает трансформатор. Так, например, силовые трансформаторы имеют наибольший к. п. д. при $\beta=0,5\div 0,6$, поэтому при номинальной нагрузке они согласно стандарту имеют соотношение потерь: $P_{\text{м.ном}}/P_0=1(0,5\div 0,6)^2\approx 3\div 4$.

Потери в стали определяются из опыта х. х., потери в обмотках — из опыта к. з. Номинальная мощность трансформатора указана на его щитке, в паспорте и каталоге. Задаваясь значениями β и $\cos \varphi_2$, можно вычислить к. п. д. трансформатора при любой нагрузке, не подвергая его непосредственным испытаниям.

§ 12.6. Рассеяние в трансформаторах

Для определения индуктивности рассеяния рассмотрим наиболее простой случай, когда первичная и вторичная обмотки трансформатора представляют собой цилиндры одинаковой высоты.

Положим, что обмотки имеют одинаковое распределение витков по высоте. Истинное распределение полей рассеяния довольно сложно. Для получения расчетных формул истинную картину распределения полей рассеяния приведем к такой, в которой все магнитные линии потоков рассеяния проходят параллельно образующим цилиндрических поверхностей обмоток и имеют длину, примерно равную их высоте (рис. 12.13, а). В этом случае распределение н. с. имеет трапециевидную форму (рис. 12.13, б).

Намагничивающая сила любой линии определяется тем числом витков, которое она охватывает. Поэтому в средних точках O_1 и O_2 , лежащих на внутренней и внешней поверхности катушки, н. с. = 0. Затем н. с. растет пропорционально расстояниям, на которых находятся линии

первичного и вторичного полей рассеяния от средних точек O_1 и O_2 , т. е. пропорционально изменению тока, охватываемого магнитными линиями. В зазоре δ между обмотками н. с. остается неизменной,

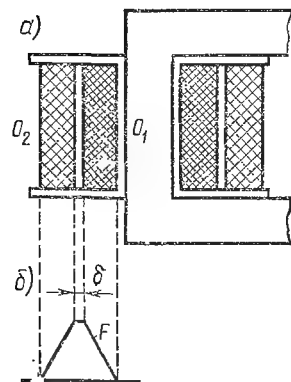


Рис. 12.13. Распределение полей рассеяния (а) и кривая распределения н. с. (б)

и распределение ее по диаметру сечения катушки трансформатора представится трапецевидной кривой.

На расстоянии x от точки O_1 при токе в 1 А н.с. магнитной линии $Iw_x = 1 \cdot w_1 x / \delta_1$, где w_1 — число витков; δ_1 — радиальный размер первичной обмотки.

Магнитное сопротивление элементарной трубки

$$\rho_{\mu} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} = \frac{10^6 h_{об}}{1,25\pi (D_1' + 2x) dx},$$

где $\mu = 0,4\pi/10^6 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Вб/(А·м) — магнитная проницаемость; $l = h_{об}$ — длина элементарной трубки и высота обмотки; $S = \pi (D_1' + 2x) dx$ — площадь поперечного сечения трубки; D_1' — внутренний диаметр первичной (ближайшей к стержню) обмотки.

Магнитный поток элементарной трубки — отношение н.с. к магнитному сопротивлению этой трубки:

$$d\Phi_x = \frac{F_1}{\rho_p} = 1,25 w_1 \frac{x}{\delta_1} \frac{\pi (D_1' + 2x) dx}{h_{об}} 10^{-6}.$$

Так как магнитный поток сцеплен с числом витков $w_1 x / \delta_1$, то по ширине первичной обмотки число потокоцеплений будет

$$\int_0^{\delta_1} d\Phi_x \left(w_1 \frac{x}{\delta_1} \right) = 1,25 \frac{w_1^2}{h_{об}} \left[\frac{\delta_1}{3} \left(D_1' + \frac{3}{2} \delta_1 \right) \right] 10^{-6}.$$

В зазоре между обмотками н.с. магнитной линии равна $l_1 w_1$, а магнитный поток сцеплен со всеми витками первичной обмотки w_1 . В зазоре число потокоцеплений элементарной трубки, находящейся на расстоянии y от внешней образующей первичной обмотки, $d\Phi_y w_1 = 1,25 (w_1^2 / h_{об}) [\pi (D_1' + 2\delta_1 + 2y) dy] 10^{-6}$, полное число потокоцеплений по ширине $\delta/2$ зазора

$$\int_0^{\delta/2} d\Phi_y w_1 = 1,25 \frac{w_1^2}{h_{об}} \pi \frac{\delta}{2} \left(D_1' + 2\delta_1 + \frac{\delta}{2} \right) 10^{-6}.$$

Так как δ_1 и δ очень малы по сравнению с D_1' , то введем средний диаметр $D_1 \approx D_1' + 3\delta_1/2 \approx D_1' + 2\delta_1 + \delta/2$ и длину среднего витка первичной обмотки $l_1 = \pi D_1$.

Индуктивность первичной обмотки (Г)

$$L_{s1} = 1,25 (w_1^2 / h_{об}) l_1 (\delta_1/3 + \delta/2) 10^{-6}. \quad (12.13)$$

Индуктивность вторичной обмотки (Г)

$$L_{s2} = 1,25 (w_2^2 / h_{об}) l_2 (\delta_2/3 + \delta/2) 10^{-6},$$

где w_2 — число витков; l_2 — средняя длина витка; δ_2 — радиальный размер вторичной обмотки.

После приведения к первичной цепи индуктивность вторичной обмотки

$$L'_{s2} = 1,25 (\omega_1^2 / h_{об}) l_2 (\delta_2 / 3 + \delta / 2) 10^{-6}.$$

Индуктивность полей рассеяния обеих обмоток

$$L_s = L_{s1} + L'_{s2} = 1,25 \omega_1^2 \delta' 10^{-6} l / h_{об},$$

где $l = (l_1 + l_2) / 2$ — средняя длина витка обеих обмоток; $\delta' = \delta + (\delta_1 + \delta_2) / 3$ — расчетный зазор между обмотками.

Индуктивное сопротивление к. з. трансформатора (Ом)

$$X_k = 2\pi f L_s \approx 8 f \omega_1^2 \delta' 10^{-6} l / h_{об}. \quad (12.14)$$

Реактивная составляющая напряжения к. з.

$$u_x = \frac{I_1 X_k}{U_1} 100\% = \frac{176 I_1 \omega_1 l \delta'}{(v \Phi_{max} h_{об})} 10^{-6} \%, \quad (12.15)$$

где v — число стержней, на которых размещены обмотки (для броневого трансформатора $v=1$, для стержневого $v=2$).

§ 12.7. Регулирование напряжения трансформатора

Выше было установлено, что при неизменном первичном напряжении U_1 колебания нагрузки трансформатора вызывают сравнительно малое изменение вторичного напряжения U_2 . Однако в условиях эксплуатации электроустановок часто возникает необходимость поддерживать вторичное напряжение постоянным или изменить его в определенных пределах. Для решения этой задачи изменяют э. д. с. вторичной обмотки, действующее значение которой $E_2 = 4,44 \omega_2 \Phi_m$. Регулирование э. д. с. обмотки возможно путем изменения числа ее витков или магнитного потока. Наибольшее распространение получил первый путь. Для этого обмотки выполняют с несколькими ответвлениями, каждое из которых соответствует определенному числу витков. При переключении обмоток напряжение изменяется ступенями. Обмотки трансформаторов больших мощностей обычно имеют пять ответвлений, которые позволяют изменять вторичное напряжение на $\pm 2,5$ и $\pm 5\%$ от номинального. Регулировочные ответвления могут быть сделаны как на первичной, так и на вторичной обмотках. Если трансформатор работает в условиях постоянства первичного напряжения, то регулировочные ответвления делают на вторичной обмотке. Если же первичное напряжение изменяется, то регулировочные ответвления целесообразно делать на первичной обмотке так, что бы при изменениях первичного напряжения отношение U_1 / ω_1 оставалось неизменным. В этом случае магнитный поток в магнитопроводе трансформатора остается неизменным, не увеличивая намагничивающего тока и потерь в стали, что обеспечивает наиболее выгодный к. п. д. трансформатора. Однако часто меняется напряжение на стороне нерегули-

руемой обмотки, а следовательно, возбуждение трансформатора и к. п. д. (в больших пределах).

Понижающие сетевые трансформаторы большей частью работают в условиях изменения первичного напряжения, и регулировочные ответвления делаются у обмотки ВН. По конструктивным соображениям регулировочные ответвления целесообразно делать у обмотки ВН, так как в этом случае переключатели должны быть рассчитаны на меньший ток. Так как при регулировании напряжения отключается часть витков только одной обмотки, то при этом

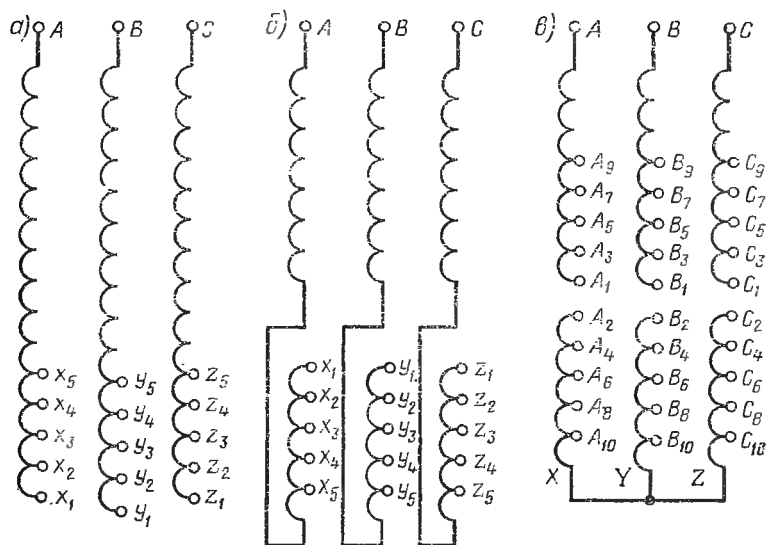


Рис. 12.14. Схемы размещения отключаемых витков

нарушается симметричное расположение действующих витков обмоток относительно друг друга. Это приводит к дополнительному магнитному рассеянию (появляется поперечный поток) и возникновению механических осевых усилий в обмотках. При аварийных режимах (например, к. з.) механические усилия могут достигать опасной для обмоток величины. Поэтому необходимо обеспечить достаточную механическую прочность обмоток.

При отключении части витков в середине обмотки механическая прочность обмотки снижается в меньшей степени, чем при отключении части витков у конца обмотки. При многослойных цилиндрических обмотках у трансформаторов небольших мощностей отключаемые витки размещают во внешнем слое обмотки и ответвления делают около нулевой точки (рис. 12.14, а). В обмотках других конструкций ответвления располагают в средней части обмотки.

Обратная схема (рис. 12.14, б) позволяет разместить ответвления около нулевой точки и в тоже время в средней части обмотки. Прямую схему обмотки (рис. 12.14, в) с регулировочными ответвлениями в средней части обмотки применяют в непрерывных обмотках трансформаторов мощностью свыше 1000 кВ·А при напряжениях 35 кВ.

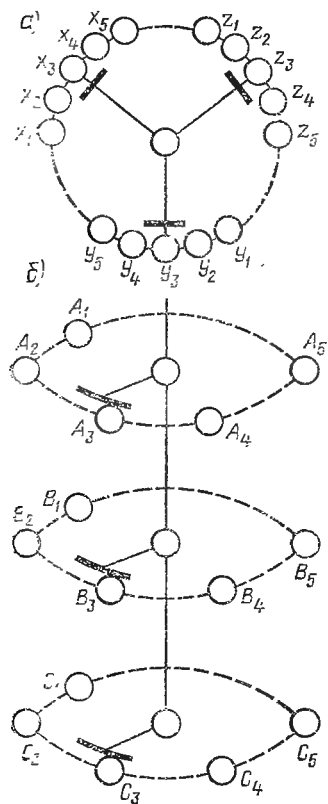


Рис. 12.15. Схемы переключателей ответвлений

В трансформаторах с обмотками, имеющими регулировочные ответвления около нулевой точки, применяют один переключатель, общий для всех трех фаз (рис. 12.15, а). При прямой схеме обмотки используют три переключателя (по одному для каждой фазы), располагаемые один над другим на общей оси (рис. 12.15, б). Переключают с одного ответвления на другое только после отключения трансформатора от первичной и вторичной сетей, чтобы избежать возможных к. з. регулировочных витков обмотки и разрыва цепи обмотки под нагрузкой. Переключение осуществляют поворотом рукоятки, расположенной на крышке бака трансформатора. Существуют также схемы регулирования напряжения без отключения трансформаторов от сети (под нагрузкой — РПН). Для ограничения токов к. з. в регулируемых витках в процессе их переключения эти витки замыкаются на относительно большое индуктивное сопротивление.

§ 12.8. Нагревание и охлаждение трансформаторов

При работе трансформаторов часть преобразуемой ими энергии теряется, поэтому полезная мощность меньше мощности потребляемой. Потеря энергии происходит как в магнитопроводе трансформатора, так и в его обмотках. Обмотки трансформатора нагреваются протекающими по ним токами. Потеря энергии в обмотках трансформатора P_m пропорциональна квадрату плотности тока j и массе обмоточного провода G_m ($P_m \sim j^2 G_m$). В магнитопроводе трансформатора возникают потери энергии за счет перемагничивания стали и вихревых токов. Потери в стали зависят от частоты, магнитной индукции, магнитных свойств материала и толщины стальных листов, из которых собран магнитопровод. Эти потери P_c пропорциональны массе магнитопровода G_c и квадрату макси-

мальной магнитной индукции $B_{\max}$ в магнитопроводе ($P_c \sim B^2_{\max} G_c$). Нельзя безгранично увеличивать электромагнитные нагрузки трансформатора: магнитную индукцию (так как при превышении известной меры намагничивающий ток может оказаться чрезмерно большим) и плотность тока (так как падение напряжения в сопротивлении обмоток при этом возрастает, понижая вторичное напряжение трансформатора при нагрузке). В еще большей мере электромагнитные нагрузки ограничены допустимыми потерями энергии в активных материалах трансформатора, т. е. в стали магнитопровода и в проводах обмоток. При увеличении магнитной индукции растут потери в стали, а при увеличении плотности тока — потери в проводах обмоток.

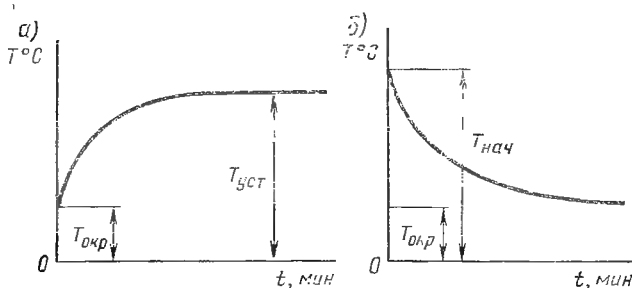


Рис. 12.16. Изменение температуры трансформатора

Потери энергии, выделяющиеся в трансформаторе при его работе, превращаются в тепло и нагревают его. Это тепло излучается от поверхности трансформатора в окружающую среду. Охлаждаются нагретые части трансформатора за счет теплоизлучения, теплопроводности и конвекции. Тепло в окружающую среду отводится главным образом со свободных частей трансформатора (наружная цилиндрическая поверхность обмотки и поверхность ярма). Для увеличения поверхности охлаждения делают вентиляционные каналы как в магнитопроводе, так и в обмотках. Внутренние части магнитопровода и обмоток отдают свое тепло поверхностным частям благодаря теплопроводности. Количество тепла, излучаемого в окружающую среду, зависит как от поверхности охлаждения, так и от разности температур нагретых частей трансформатора и окружающей среды. Повышение температуры трансформатора сначала происходит быстро (рис. 12.16, а), так как мала разность температур трансформатора и окружающей среды. Следовательно, количество тепла, излучаемого в окружающую среду, также мало и потеря энергии в трансформаторе расходуется в основном на его нагрев. По мере повышения температуры трансформатора увеличивается количество тепла, излучаемого в окружающую среду и дальнейший нагрев трансформатора происходит медленнее. Температура повышается до определенного установившегося значения $T_{уст}$, при котором количество тепла, выделяющегося в трансформаторе, полностью излучается в окружающую среду.

Если трансформатор после его работы на некоторое время отключить, то нагретые части начнут охлаждаться. Когда разность температур трансформатора и окружающей среды достаточно велика, охлаждение трансформатора происходит быстро (рис. 12.16, б). По мере понижения температуры трансформатора разности температур его и окружающей среды уменьшается и процесс охлаждения замедляется.

Если при работе трансформатора в любой его точке произойдет нагрев до температуры, выше допустимой для материала, из которого он изготовлен, то трансформатор может выйти из строя. Таким образом электромагнитные нагрузки ограничиваются тем материалом, который наиболее чувствителен к нагреву.

Применяемые в трансформаторах изоляционные материалы по-разному реагируют на повышение температуры. Раньше других выходит из строя бумажная изоляция, наименее нагревостойкая из широко используемых в трансформаторостроении изоляционных материалов.

Трансформатор представляет собой неоднородное тело, и поэтому отдельные его части нагреваются в различной мере. Необходимо, чтобы температура наиболее нагретых частей не превышала допустимой. Нагрев трансформатора зависит от потерь энергии и от интенсивности охлаждения. Чем интенсивнее охлаждение трансформатора, тем больше будут допустимые потери энергии. Для трансформаторов различных мощностей условия охлаждения различны: чем больше номинальная мощность трансформатора, тем сложнее осуществить его охлаждение. Так, например, для трансформаторов малых мощностей (десятки или сотни вольтампер) естественное воздушное охлаждение оказывается достаточным, для трансформаторов больших мощностей (десятки, сотни, тысячи и т. д. киловольтампер) применяют специальные меры для повышения интенсивности охлаждения (масляное охлаждение, вентиляционные каналы, обдув бака и др.). Это объясняется следующим: с повышением номинальной мощности трансформатора увеличиваются его линейные размеры. Если для трансформаторов различных номинальных мощностей использовать одинаковые активные материалы (сталь магнитопровода и обмоточный провод) и допустить одинаковые электромагнитные нагрузки (магнитную индукцию и плотность тока), то потери энергии в трансформаторе будут пропорциональны массе активного материала G или его объему $V \sim \Delta P \sim G$, т. е. третьей степени линейного размера ($V \sim l^3$ и $\Delta P \sim l^3$). Поверхность охлаждения $S_{\text{охл}}$, т. е. l^2 . Таким образом, с увеличением номинальной мощности трансформатора (с увеличением его размеров) потери энергии в нем увеличиваются в большей мере, чем поверхность охлаждения, т. е. количество тепла, выделяющегося в трансформаторе, увеличивается больше, чем количество тепла, излучаемого в окружающую среду. Чтобы избежать перегрева трансформаторов при увеличении их мощности, повышают интенсивность их охлаждения.

В сухих трансформаторах наружные нагретые поверхности обмоток и магнитопровода отдают тепло омывающему их воздуху путем конвекции и излучения. В масляных трансформаторах тепловая энергия передается в окружающую среду через трансформаторное масло, заливаемое в бак с помещенным туда трансформатором. Масло, омывающее магнитопровод и обмотки трансформатора, путем конвекции отводит выделяющееся в них тепло и отдает его стенкам бака. Частицы масла, уровень которого значительно выше верхнего уровня магнитопровода (рис. 12.17), соприкасаются с горячими наружными поверхностями обмоток и магнитопровода и нагреваются. Нагретые частицы масла устремляются вверх и отдают свое тепло в окружающую среду через стенки и крышку бака. Охлажденные частицы масла движутся вниз, уступая место более нагретым. Внешняя поверхность стенок и крышки бака, омываемые воздухом, отдают тепло в окружающую среду путем конвекции и излучения. В некоторых случаях для повышения интенсивности теплопередачи применяют искусственную усиленную циркуляцию масла (или воздуха) с помощью насосов (или вентиляторов).

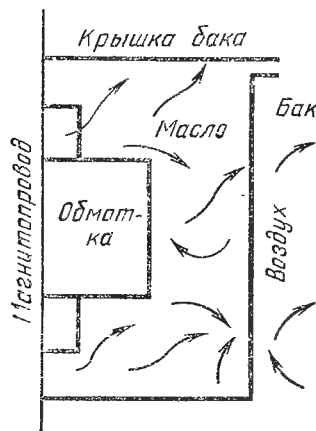


Рис. 12.17. Схема охлаждения масляного трансформатора

Трансформаторное масло — не только хорошая охлаждающая среда, но и хороший изоляционный материал, обеспечивающий высокую электрическую прочность трансформатора при сравнительно малых изоляционных промежутках. Это свойство трансформаторного масла позволяет создавать компактные конструкции обмоток и магнитопровода, а масляное охлаждение дает возможность применять сравнительно высокие электромагнитные нагрузки активных материалов и производить трансформаторы с относительно малым расходом этих материалов. Масляное охлаждение наиболее широко используют в силовых трансформаторах.

Трансформаторное масло в процессе эксплуатации загрязняется, увлажняется и ухудшает свои диэлектрические свойства, поэтому необходима его периодическая очистка, сушка и замена. Еще оно является горючим материалом, требующим установки в масляных трансформаторах специальных мер пожарной безопасности. Когда по соображениям пожарной опасности применение масляных трансформаторов недопустимо, используют трансформаторы сухие или с негорючими наполнителями (совол, совтол, пиранол, кварцевый кристаллический песок). Сухие трансформаторы имеют защитные кожухи с отверстиями, закрытыми сетками. Применение в качестве изоляции обмоток стекловолна или асбеста дает возможность значительно повысить рабочую температуру обмоток

и получить практически пожаробезопасную установку. Это свойство сухих трансформаторов позволяет устанавливать их внутри сухих помещений в тех случаях, когда обеспечение пожарной безопасности установки является решающим фактором. Так как в сухих трансформаторах охлаждающая среда — воздух, который возобновляется непрерывно, то исключаются старение масла и необходимость его периодической чистки и замены. Однако воздух — менее совершенная изолирующая и охлаждающая среда, чем трансформаторное масло. Поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных. Электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах приходится уменьшать по сравнению с электромагнитными нагрузками масляных трансформаторов, это увеличивает сечения проводов обмоток и магнитопровода, а следовательно, массу и стоимость активных материалов у сухих трансформаторов больше, чем у масляных.

Так как обмотки сухих трансформаторов непосредственно соприкасаются с воздухом и увлажняются, сухие трансформаторы устанавливают только в сухих закрытых помещениях. Для уменьшения гигроскопичности обмотки пропитывают специальными лаками. Применение новых нагревостойких и негорючих изоляционных материалов, обладающих высокой теплопроводностью, дает возможность увеличить электромагнитные нагрузки и уменьшить стоимость активных материалов. В тепловом отношении трансформатор представляет собой неоднородное тело. Стальные листы магнитопровода обладают высокой теплопроводностью, а изоляционные прослойки между листами стали — малой. Обмотки также состоят из меди или алюминия с высокой теплопроводностью и изоляционного материала, плохо проводящего тепло. При работе трансформатора нагретые внутренние части магнитопровода и обмоток отдают тепло наружным поверхностям, от которых тепло отводится маслом или воздухом. Между нагретыми частями трансформатора и маслом (воздухом) устанавливается определенная разность температур, неодинаковая для различных точек по высоте.

При небольших мощностях (до 25 кВ·А) не требуется особых охлаждающих устройств, поэтому трансформаторы помещают в гладкие баки, через стенки которых происходит теплоотдача. В более мощных масляных трансформаторах для увеличения охлаждающей поверхности широко применяют трубчатые баки (рис. 12.18, а). Стальные трубы диаметром 30÷60 мм располагают вертикально, параллельно стенке бака. Концы труб изгибают и сваривают в верхнюю и нижнюю части стенки. Для увеличения поверхности охлаждения трубы на стенках бака располагают в два ряда. Применяют трубчатые баки, у которых трубы расположены в три и четыре ряда, а также баки с трубами овального сечения. В трансформаторах большой мощности (>1800 кВ·А) трубы объединяют группами в отдельные охладители — радиаторы (рис. 12.18, б). На гидроэлектростанциях, где имеется достаточное количество проточной воды, устанавливают трансформаторы с искусственным водомас-

ляным охлаждением, в которых нагретое масло при помощи насоса пропускают через водяной маслоохладитель. В трансформаторах большой мощности для усиления процесса теплопередачи применяют обдувание каждого радиатора отдельными вентиляторами, а иногда — искусственное воздушно-масляное охлаждение, при котором нагретое масло при помощи насоса пропускается через вынесенный охладитель, обдуваемый воздухом.

В процессе работы трансформатора изменяется его температура, что приводит к изменению уровня масла. У трансформаторов мощностью до 75 кВ·А допускаются колебания уровня масла внутри бака, у трансформаторов больших мощностей и высоких напряжений баки снабжают расширителями — цилиндрический сосуд из листовой стали, устанавливаемый под крышкой бака и соединяющийся с баком патрубком. Колебания уровня масла вследствие изменения температуры происходят лишь в расширителе. Применение расширителя уменьшает поверхность соприкосновения масла с воздухом, который вредно действует на масло, увлажняя и окисляя его. Влага и грязь, попадающие в расширитель из воздуха, собираются в нижней его части (в отстойнике) и удаляются через пробку.

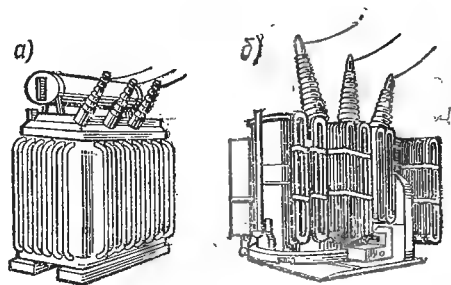


Рис. 12.18. Трансформатор с трубчатым (а) и радиальным (б) баком

Глава 13

ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 13.1. Магнитопроводы трехфазных трансформаторов

Трехфазный трансформатор может быть составлен из трех одинаковых однофазных, тогда его называют *групповым*. Первичные обмотки трех однофазных трансформаторов соединяют между собой по одной из трехфазных схем, так же как и вторичные обмотки. Групповые трехфазные трансформаторы находят применение при очень больших мощностях ($> 3 \times 630$ кВ·А). Это объясняется тем, что каждый однофазный трансформатор группы меньше по габаритам и весу, чем один трехфазный трансформатор на полную мощность группы. Кроме того, при групповом трансформаторе в качестве резерва достаточно иметь один однофазный трансформатор (треть мощности группы), в то время, как при одном трехфазном трансформаторе в резерве приходится устанавливать другой трансформатор на полную мощность.

Групповой трансформатор имеет известные преимущества при больших мощностях, когда условия транспорта и надежность при

эксплуатации имеют особенно важное значение. Однако групповой трансформатор несколько дороже трехфазного на ту же мощность, занимает больше места и имеет меньший к. п. д.

На рис. 13.1, а изображено устройство выемной (активной) части трехфазного стержневого трансформатора с масляным охлажде-

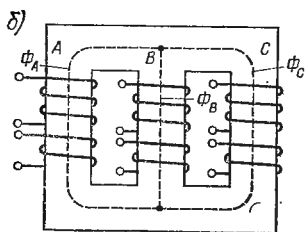
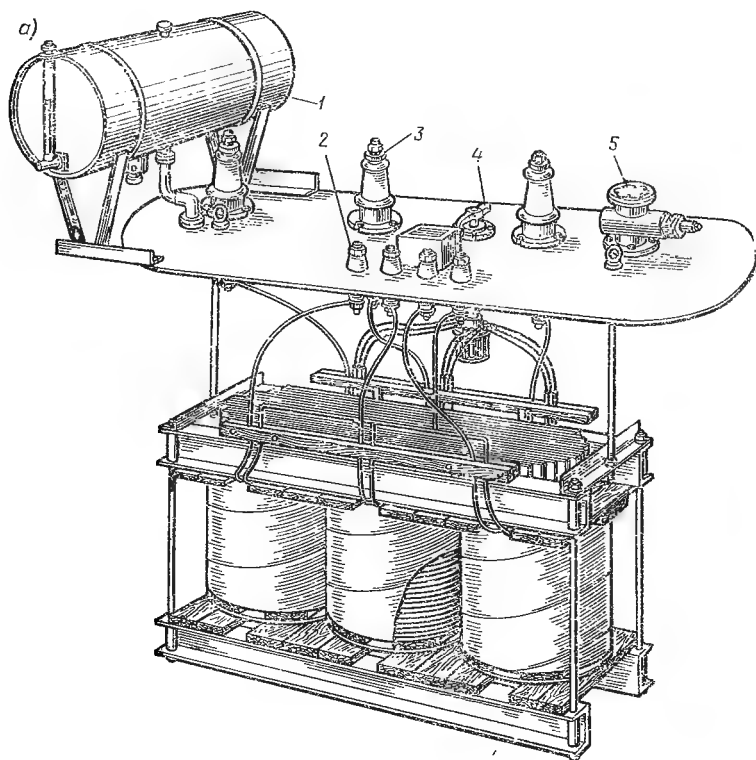


Рис. 13.1. Устройство выемной части стержневого трехфазного трансформатора (а) и схема устройства (б)

нием. Над крышкой бака помещен расширитель 1. На крышке бака расположены выводы обмоток низшего 2 и высшего 3 напряжения, переключатель 4 для регулировки напряжения и газовое реле 5 для защиты трансформатора от перегрузок и коротких замыканий. Схема трехфазного трансформатора со связанной магнитной системой изображена на рис. 13.1, б. Получение такого магнитопровода можно представить себе следующим образом. Три

одинаковых однофазных трансформатора выполнены так, что их первичные и вторичные обмотки размещены на одном стержне сердечника, а другой стержень магнитопровода каждого трансформатора не имеет обмотки. Если эти три трансформатора расположить так, чтобы стержни, не имеющие обмоток, находились рядом, то эти три стержня можно объединить в один — 0. Через объединенный стержень 0 будут замыкаться магнитные потоки трех однофазных трансформаторов, которые равны по величине и сдвинуты по фазе на одну треть периода. Так как сумма трех равных по амплитуде и сдвинутых по фазе на $1/3$ периода магнитных потоков равна нулю в любой момент времени ($\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$), то в объединенном стержне магнитного потока нет и надобность в этом стержне отпадает. Таким образом для магнитопровода достаточно иметь три стержня, которые по конструктивным соображениям располагаются в одной плоскости. На каждом стержне трехфазного трансформатора размещаются обмотки высшего и низшего напряжения одной фазы. Стержни соединяются между собой ярмом сверху и снизу. Длина магнитных линий потока среднего стержня меньше, чем крайних стержней. Поэтому магнитный поток среднего стержня встречает на своем пути меньшее магнитное сопротивление, чем магнитные потоки крайних стержней. Следовательно, в фазе, обмотка которой помещена на среднем стержне, протекает меньший намагничивающий ток, чем в фазах, обмотки которых помещены на крайних стержнях.

В трехфазных трансформаторах так же, как и в однофазных, поперечное сечение яра делают больше, чем стержня, для уменьшения намагничивающих токов.

§ 13.2. Соединение обмоток трехфазных трансформаторов

Конструктивно обмотки трехфазных трансформаторов выполняются так же, как и однофазных. Начала фаз обмоток ВН обозначены прописными латинскими буквами *A*, *B* и *C*; концы фаз этих обмоток — *X*, *Y* и *Z*. Если обмотка ВН имеет выведенную нулевую точку, то этот зажим обозначают 0.

Начала фаз обмоток НН обозначаются строчными латинскими буквами *a*, *b*, *c*, концы фаз — *x*, *y*, *z*, вывод нулевой точки — 0.

Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены в звезду (рис. 13.2, *а*), когда концы всех трех фаз соединены между собой, образуя общую нейтральную (нулевую) точку, а свободные начала трех фаз подключены к трем проводам сети источника или приемника электрической энергии переменного тока. При соединении обмоток в треугольник (рис. 13.2, *б*) начало первой фазы соединяется с концом второй, начало второй фазы — с концом третьей, начало третьей фазы — с концом первой. Точки соединения начала одной фазы с концом другой подключены к проводам трехфазной сети переменного тока.

Помимо двух основных схем (звезда и треугольник) иногда применяют схему соединения в зигзаг (рис. 13.2, в). В этой схеме фаза состоит из двух катушек с одинаковым числом витков, находящихся на различных стержнях и соединенных встречно. Э. д. с. фазы обмотки, соединенной в зигзаг, равна геометрической разности э. д. с. двух катушек. Эти э. д. с. сдвинуты на $\frac{1}{3}$ периода по фазе так же, как и магнитные потоки двух различных стержней, поэтому

$$E_{\Phi z} = \sqrt{3} E_{\text{кат}},$$

где $E_{\Phi z}$ — э. д. с. фазы при соединении обмоток в зигзаг; $E_{\text{кат}}$ — э. д. с. одной катушки.

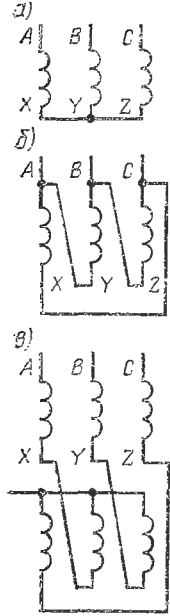
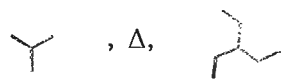


Рис. 13.2. Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора

При соединении обмоток в треугольник или в звезду две катушки, входящие в одну фазу, будут соединены последовательно, так что э. д. с. фазы при схеме треугольник и звезда будут равны арифметической сумме э. д. с. катушек: $E_{\Phi} = E_{\Phi \Delta} = 2E_{\text{кат}}$.

Следовательно, при одинаковых размерах и расходе обмоточного провода э. д. с. фазы при схеме зигзаг меньше, чем при схемах звезда и треугольник. Таким образом, схема соединения обмоток трехфазного трансформатора в зигзаг неэкономична и не нашла широкого практического применения. Эта схема используется в ртутных выпрямителях (отсутствует вынужденное намагничивание сердечника); в сложностовых схемах выпрямления для преобразования симметричной трехфазной системы в 6-, 9-, 12- и т. д. фазную.

Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов в звезду, треугольник и зигзаг соответственно обозначаются знаками



. Если обмотка имеет выведенную нулевую точку, то в соответствующем знаке обозначается нулевая точка

и показывается вывод от нее, например:



§ 13.3. Группы трехфазных трансформаторов

Группы трехфазных трансформаторов обозначаются знаками следующего вида: $\text{Y} / \text{Y} - 0, \text{Y} / \Delta - 11$ и

т. д., где знак слева от черты показывает схему соединения обмоток ВН, знак справа от черты — схему соединения обмоток НН, цифра — угол между векторами линейных э. д. с. обмоток ВН и НН, выраженный числом угловых единиц по 30° .

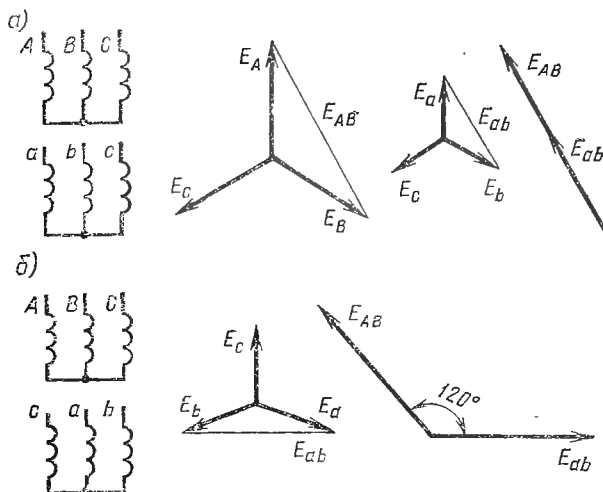


Рис. 13.3. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы э. д. с. для трансформаторов:
а — группа 0; группа 4

Так, первое обозначение группы показывает, что обмотки высшего и низшего напряжения соединены в звезду, причем обмотка НН имеет выведенную нулевую точку, и угол между векторами линейных э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения равен $0 \times 30 = 0^\circ$.

Группы трехфазных трансформаторов зависят от схем соединения обмоток, обозначения зажимов фаз обмоток ВН и НН и направления намоток. Если направление намотки обмоток ВН и НН одинаково, то э. д. с., индуцируемые в фазах обмоток, совпадают по фазе; если же обмотки имеют встречное направление намотки, то э. д. с. находятся в противофазе.

Предположим, что обмотки высшего и низшего напряжения соединены в звезду и имеют одинаковое направление намотки, что условно показано на рис. 13.3, а. Тогда э. д. с., индуцируемые в фазах обмоток высшего и низшего напряжения, будут совпадать: векторы E_a и E_A, E_b и E_B, E_c и E_C параллельны. Векторы линейных

э. д. с. соответствующих зажимов обмоток высшего и низшего напряжения ($\dot{E}_{AB}$ и $\dot{E}_{ab}$) оказались параллельны, т. е. угол между ними 0° , и трансформатор принадлежит группе 0. Если изменить обозначения зажимов обмоток НН, как показано на рис. 13.3, б, то при этом звезда фазных э. д. с. обмоток повернется на 120° . Векторы $\dot{E}_c$ и $\dot{E}_A$, $\dot{E}_a$ и $\dot{E}_B$, $\dot{E}_b$ и $\dot{E}_C$ будут параллельными, так как обмотки фаз c и A , a и B , b и C находятся на одних и тех же стержнях и сцеплены с одинаковыми потоками. Угол между векторами линейных э. д. с. $\dot{E}_{AB}$ и $\dot{E}_{ab}$ равен 120° , т. е. мы получили группу 4. Если произвести еще одно изменение обозначения зажимов обмоток НН, то векторы фазных и линейных э. д. с. обмоток НН повер-

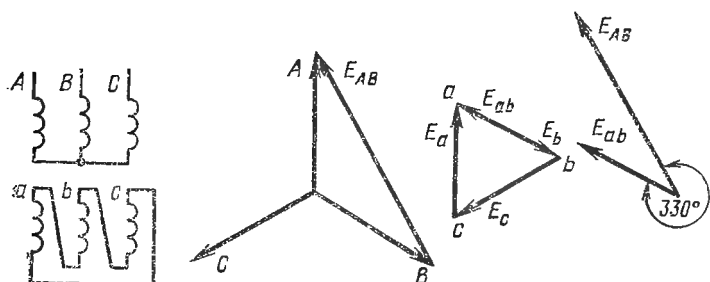


Рис. 13.4. Схема соединения обмоток и векторные диаграммы э. д. с. для трансформатора группы 11

нутятся еще на 120° по часовой стрелке и мы получим группу 8. Если обмотки НН намотать встречно обмоткам ВН или, что то же самое, изменить обозначения начал и концов фаз НН, то фазные э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения будут направлены встречно, и угол между векторами линейных э. д. с. $\dot{E}_{AB}$ и $\dot{E}_{ab}$ равен 180° , т. е. мы получили группу 6. При встречном направлении намоток обмоток высшего и низшего напряжений мы можем также производить круговое смещение зажимов и получить при этом группу 10 и группу 2. Таким образом, при соединении обмоток звезда — звезда мы получим любую четную группу: 2, 4, 6, 8, 10, 0.

При соединении звезда — треугольник векторы фазных э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения, находящихся на одних стержнях сердечника, при согласном направлении намоток будут иметь одинаковое направление. При соединении обмоток треугольником линейные э. д. с. совпадают с фазными, при соединении звездой линейные э. д. с. смещены на 30° по фазе относительно фазных э. д. с. Поэтому для схемы, изображенной на рис. 13.4, треугольники линейных э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения будут смещены на -30° или $+330^\circ$, т. е. мы получили группу 11, показанную на векторной диаграмме. При круговом смещении зажимов обмоток НН треугольник линейных э. д. с. будет поворачиваться на 120° или 240° , т. е. мы получим группы 3 и 7. При встречном направлении намоток обмоток НН можно получить группы 1, 5, 9.

Таким образом, при схемах звезда — треугольник или треугольник — звезда может быть получена любая нечетная группа: 1, 3, 5, 7, 9, 11. В СССР стандартными группами являются группы

$$\begin{array}{c} \text{Y} \quad / \quad \text{Y} \quad -0; \quad \text{Y} \quad / \Delta-11 \text{ и} \quad \text{Y} \quad / \Delta-11. \end{array}$$

В стандартных группах обмотки ВН соединены в звезду для уменьшения фазной э. д. с. Фазная э. д. с. при соединении обмоток звездой в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем при соединении треугольником, так как линейные напряжения для обеих схем одинаковы. Поэтому при соединении обмоток звездой проще изоляция обмотки ВН, которая имеет меньшее число витков, чем при соединении треугольником. Обмотки НН в стандартных схемах преимущественно соединяют в треугольник, так как такая схема соединения менее чувствительна к несимметрии нагрузок.

Достоинство схемы «звезда с нулем» — возможность получения двух различных напряжений при четырехпроводной сети. Проверяют группу трансформаторов при одном (обычно номинальном) напряжении обмоток, не переключая число витков.

Группу соединения обмоток трехфазного трансформатора можно определить по показаниям двух вольтметров (ГОСТ 3484—65). При этом соединяют электрически одноименные вводы обмоток ВН и НН (например, А и а) на крышке испытуемого трансформатора. К одной из обмоток (НН или ВН) подводят трехфазное напряжение небольшой величины (100 или 200 В) и точным вольтметром (класса точности не ниже 0,5) измеряют поочередно напряжения между зажимами обмоток $b-B$, $b-C$, $c-B$ и $c-C$. Измеренные напряжения сравнивают с расчетными, их совпадение означает правильность группы соединения.

Пример. Трансформатор мощностью 180 кВ·А имеет линейные напряжения обмоток ВН 10 кВ, НН 3,15 кВ. Обмотки ВН соединены в звезду, а обмотки НН — в треугольник. Трансформатор принадлежит 11-й группе. Определить напряжение между зажимами $b-B$, $c-C$, $b-C$ и $c-B$, если обмотки НН включены под номинальное линейное напряжение, а зажимы А и а электрически соединены.

Решение. Коэффициент трансформации для линейных э. д. с. $k = 10\,000/3150 = 3,17$.

Между зажимами $b-B$, $c-C$ и $c-B$ напряжение

$$\begin{aligned} U_{b-B} = U_{c-C} = U_{c-B} &= U \sqrt{1 - \sqrt{3}k + k^2} = \\ &= 3,15 \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot 3,17 + 3,17^2} = 7,35 \text{ кВ.} \end{aligned}$$

Между зажимами $b-C$ напряжение

$$U_{b-C} = U \sqrt{1 + k^2} = 3,15 \sqrt{1 + 3,17^2} = 10,5 \text{ кВ.}$$

В трансформаторах небольшой мощности и невысоких напряжений группа соединения обмоток может быть определена прямым методом (по показанию фазометра). Фазометр представляет собой измерительный прибор, определяющий угол сдвига фаз между током и напряжением (или между токами в двух

двух). Прибор имеет две обмотки, одну из которых включают в сеть обмотки НН, а другую — в цепь обмотки ВН. Обмотки фазометра включают через дополнительные сопротивления большой величины.

§ 13.4. Третьи гармоники в кривых тока холостого хода, магнитного потока и электродвижущих сил

При синусоидальном приложенном напряжении кривая тока х.х. несинусоидальна (см. рис. 11.2) за счет нелинейности магнитной характеристики материала магнитопровода. Так как потери в ста-

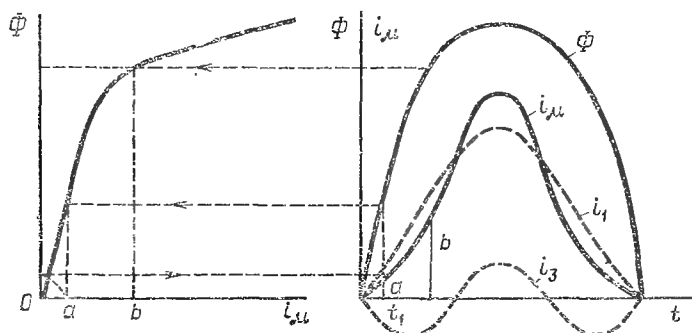


Рис. 13.5. Построения кривой намагничивающего тока $i_{\mu} = f(t)$

ли магнитопровода относительно малы, то и активная составляющая тока х.х. также мала. Поэтому ток х.х. очень мало отличается от реактивного намагничивающего тока. Пренебрегая потерями в стали (гистерезисом и вихревыми токами), магнитную характеристику материала магнитопровода $\Phi = f(i_{\mu})$ можно представить в виде, показанном на рис. 13.5. Кривую магнитного потока $\Phi = f(t)$ примем синусоидальной (при условии синусоидальности приложенного напряжения). Кривую намагничивающего тока $i_{\mu} = f(t)$ определяется графически. Для выбранного момента времени t_1 определяем магнитный поток $\Phi = f(t)$ и это значение потока переносим на зависимость $\Phi = f(i_{\mu})$. Абсцисса найденной точки a определит значение i_{μ} , соответствующее моменту t_1 . Это значение намагничивающего тока отложим на временной диаграмме. Поступая таким же образом, далее находим ряд точек b и т. д., по которым строим кривую $i_{\mu} = f(t)$. Эта кривая, как видно из графика, помимо основной (первой) гармоники содержит третью, пятую и т. д. (все нечетные гармоники). Кривая симметрична относительно четверти периода и четных гармоник не содержит. На графике показана первая и третья гармоники тока i_{μ} , а гармоники более высокого порядка опущены.

Третьи гармоники (и все кратные трем) в кривой тока могут существовать не при всех схемах соединения обмоток трехфазной системы, так как эти гармоники во всех фазах в любой момент времени имеют одинаковое значение и направление. При схеме соеди-

нения обмоток звезда с нулем (рис. 13.6, а) третьей гармоники тока, совпадающие по фазе, будут направлены во всех трех фазах либо от источника энергии (генератора) к трансформатору, либо обратно. Через нулевой провод будет протекать ток $3i_3$, равный сумме третьей гармоники тока трех фаз.

При соединении обмоток в треугольник (рис. 13.6, б) третьи гармоники токов в фазах имеют одинаковое направление, так что все три фазы окажутся включенными последовательно, образуя короткозамкнутый контур для третьих и кратных трех гармоник тока. Для схемы звезда (рис. 13.6, в), а также для схем зигзаг без вывода нулевой точки

для третьих и кратных трех гармоник тока замкнутой цепи нет и эти гармоники в кривой тока х. х. не содержатся.

Так как всеми гармониками порядка выше третьего мы пренебрегаем, а третьи гармоники отсутствуют, то при схеме звезда ток х. х. окажется синусоидальным (рис. 13.7).

Изобразив магнитную характеристику $\Phi = f(i_\mu)$ и синусоиду тока х. х. $i_\mu = f(t)$ графически, найдем зависимость $\Phi = f(t)$. Для этого произвольно выбираем момент t_1 и по кривой $i_\mu = f(t)$ определяем значение тока i_μ , соответствующее этому моменту времени (ордината a). Это значение тока отложим на оси абсцисс магнитной характеристики (точка a) и по зависимости $\Phi = f(i_\mu)$ найдем значение магнитного потока (ордината a'), которое отложим на временной диаграмме для момента t_1 . Поступая аналогично, далее находим ряд точек b и др., по которым строим зависимость $\Phi = f(t)$. Как видно из графика, эта зависимость несинусоидальна и помимо основной (первой) Φ_1 содержит и третью Φ_3 .

Таким образом, при схеме звезда (или зигзаг) без вывода нулевой точки кривую магнитного потока $\Phi = f(t)$ можно представить как результат наложения третьей гармоники Φ_3 на первую Φ_1 (рис. 13.8, а). Каждая гармоника магнитного потока индуцирует свою э. д. с., отстающую от кривой соответствующего потока на четверть периода (рис. 13.8, б). Сложив обе гармонические э. д. с. e_1 и e_3 , получим кривую результирующей э. д. с. e , имеющую заостренный характер. Это вызывает увеличение амплитуды фазного напряжения.

При групповом трансформаторе, состоящем из трех однофазных, магнитные цепи независимы и третья гармоника магнитного потока, так же как и первая, замыкается по магнитопроводу, встречая на своем пути относительно малое магнитное сопротивление. По-

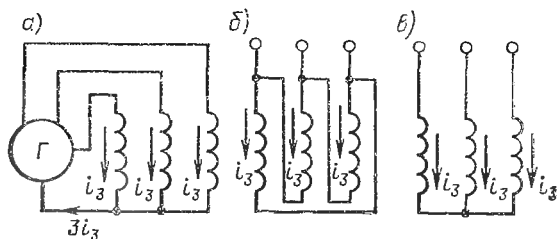


Рис. 13.6. Третья гармоника тока при схеме звезда с нулем (а), треугольник (б) и звезда (в)

этому третья гармоника как магнитного потока, так и э. д. с. будет иметь большое значение. При обычных насыщениях стали амплитуда третьей гармонической э. д. с. E_{m3} в групповом трансформаторе может достигать 50—60% амплитуды первой гармоники э. д. с. E_{m1} , что нежелательно, а в трансформаторах ВН опасно увеличива-

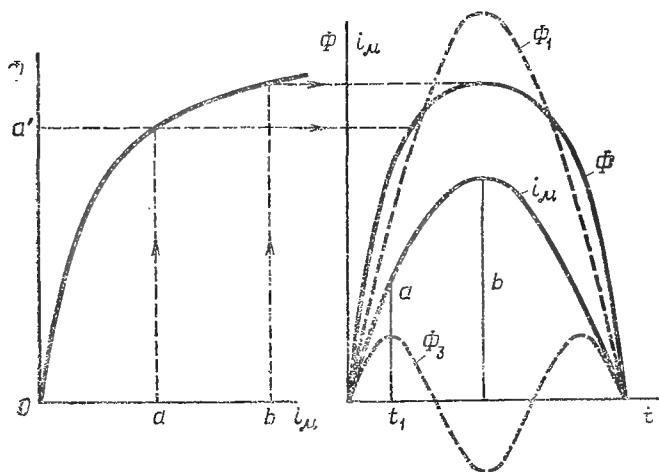


Рис. 13.7. Построение кривой $\Phi = f(t)$ при синусоидальном намагничивающем токе

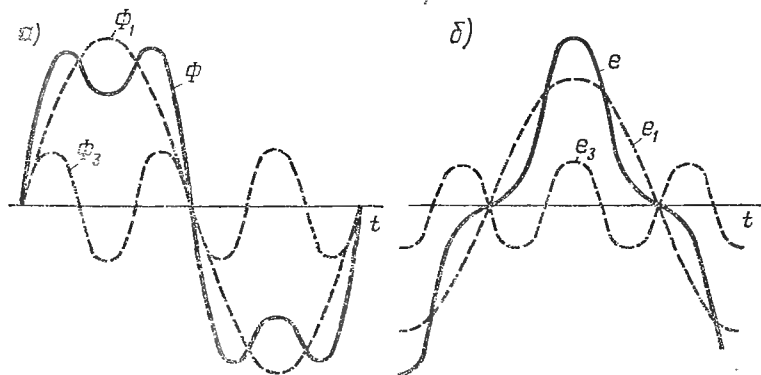


Рис. 13.8. Кривые магнитного потока $\Phi = f(t)$ (а) и э. д. с. $e = f(t)$ (б) при наличии первой и третьей гармоник

ет фазное напряжение и требует усиления изоляции. Поэтому в групповых трансформаторах схему звезда — звезда практически не применяют.

В трансформаторе со связанной магнитной системой третьей гармонические магнитного потока во всех трех стержнях имеют одинаковое направление — либо сверху вниз (рис. 13.9), либо снизу вверх, так как в любой момент времени они равны по величине и

совпадают по фазе. Поэтому эти магнитные потоки замыкаются не по магнитопроводу, а через воздух, используя при этом стенки бака, стяжные болты и другие детали из ферромагнитного материала. Этот путь имеет достаточно большое магнитное сопротивление, и третья гармоника магнитного потока будет выражена очень слабо, вследствие чего кривая э. д. с. искажается незначительно. Однако во всех металлических частях, через которые замыкается третья гармоника магнитного потока, возникают вихревые токи, увеличивая потери энергии. Это понижает к. п. д. трансформатора и может вызвать чрезмерный нагрев его отдельных частей.

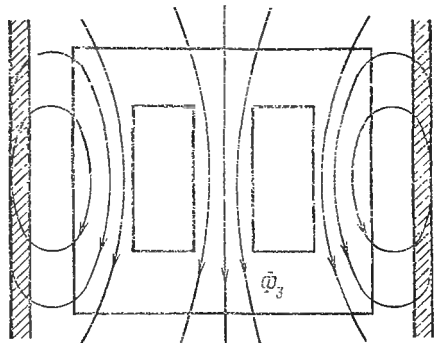


Рис. 13.9. Третьи гармонические потоки трехстержневого трансформатора

Если вторичная обмотка трансформатора соединена треугольником (или одна из вторичных в многообмоточном трансформаторе), то третьи гармоники магнитного потока не будут оказывать существенного влияния. Это объясняется тем, что схема треугольник для третьих гармоник тока представляет собой короткозамкнутый контур и токи этого контура создают магнитное поле, которое направлено встречно по отношению к третьим гармоникам магнитного потока.

§ 13.5. Работа трансформатора при несимметричной нагрузке

При симметричных нагрузках и к.з. трехфазного трансформатора в его обмотках протекают токи, равные по величине и сдвинутые по фазе на $2\pi/3$. В этом случае несимметрия магнитных цепей трехстержневого трансформатора не оказывает никакого влияния, так как она касается только весьма небольшого тока х.х. Поэтому при нагрузке и к. з. все три фазы трехфазного трансформатора находятся в одинаковых условиях и все изложенное в главе 12 для однофазного трансформатора может быть отнесено и к трехфазному.

На практике часто возникают случаи несимметричной нагрузки, когда токи в разных фазах неодинаковы по величине и имеют разный фазный сдвиг относительно своих фазных напряжений. Такие несимметричные нагрузки возникают при включении сварочных трансформаторов, мощных однофазных электрических печей и др. Несимметрия нагрузок и к.з. различным образом воздействует на

выходные параметры трансформатора при различных схемах соединения обмоток трансформатора. Предельный случай несимметричной нагрузки — несимметричное однофазное к.з., когда одна фаза трехфазного трансформатора короткозамкнута, а две другие фазы разомкнуты.

Однофазное к.з. для группы трансформатора в системе звезда — звезда изображено на рис. 13.10, а. Следовательно, ток в фазе *a* равен току короткого замыкания ($I_a = I_k$), а в фазах *b* и *c* тока нет ($I_b = 0$ и $I_c = 0$). Так как первичная обмотка не имеет вывода нулевой точки, то ток в фазе *A—X*, соответствующий току I_k в фазе *a—x*, в качестве обратного провода использует фазы *B* и *C*. По отношению к фазе *A* эти обе обмотки находятся в одинаковых условиях и ток фазы *A* разветвляется в них пополам ($I_b = I_c = 0,5 I_a$). Если ток фазы *A* направлен от начала к нулевой точке, то в фазах *B* и *C* токи направлены от нулевой точки к началам этих фаз.

В любом замкнутом контуре магнитной цепи существует равновесие н.с. В контуре, состоящем из стержней, на которых находятся *A* и *B* первичные и *a* и *b* вторичные обмотки фаз, уравнения равновесия н.с. имеет следующий вид: $I_A \omega_1 - I_k \omega_2 + I_B \omega_1 = 0$. Для двух других замкнутых магнитных контуров эти уравнения будут следующими: $I_A \omega_1 - I_k \omega_2 + I_C \omega_1 = 0$ и $I_B \omega_1 - I_C \omega_1 = 0$. Помня, что $I_B = I_C = 0,5 I_A$, получим $I_A \omega_1 - I_k \omega_2 + 0,5 I_A \omega_1 = 0$. Откуда

Рис. 13.10. Однофазное к.з. в системе звезда — звезда:

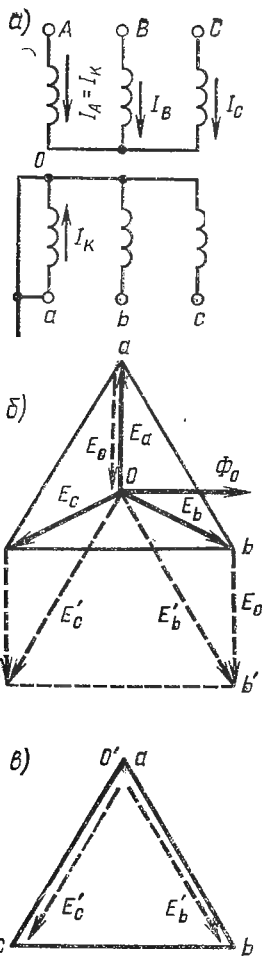
a — схема соединения обмоток; *б* — диаграмма э. д. с. при фиксированной нулевой точке; *в* — диаграмма э. д. с. при фиксированных точках *a*, *b*, *c*

$$I_A = \frac{2}{3} I_k \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{2}{3} I_k' \quad I_B = I_C = \frac{1}{3} I_k'$$

где $I_k' = I_k \omega_2 / \omega_1$. На стержне с обмотками фаз *A* и *a* действует результирующая н.с.

$$I_k \omega_2 - I_A \omega_1 = I_k \omega_2 - \frac{2}{3} I_k \frac{\omega_2}{\omega_1} \omega_1 = \frac{1}{3} I_k \omega_2,$$

направленная вверх (в том же направлении и такой же величины действуют н.с. и в двух других стержнях).



Таким образом во всех трех стержнях трансформатора действуют н.с., равные по величине и совпадающие по фазе, и возбуждают добавочные магнитные потоки Φ_0 , также равные по величине и совпадающие по фазе. Этот добавочный магнитный поток в стержнях магнитопровода существует совместно с основным потоком, соответствующим трехфазному напряжению, приложенному к первичной обмотке. Для группового и трехстержневого трансформаторов действие добавочного потока будет различно.

Групповой трансформатор. В таком трансформаторе с несвязной магнитной системой добавочный магнитный поток может достигать значительной величины, так как он замыкается по сердечнику каждого из однофазных трансформаторов и встречает на своем пути относительно малое магнитное сопротивление.

Если пренебречь активным сопротивлением r_k , то ток I_k и добавочный магнитный поток Φ_0 в каждой обмотке будут отставать по фазе от э. д. с. E_a на $\pi/2$ (рис. 13.10, б). В фазе a э. д. с. E_0 направлена встречно относительно основной э. д. с. E_a и при к.з. равна ей, а в фазах b и c э. д. с. этих фаз геометрически складываются с E_b и E_c . Если бы положение точки O было фиксировано, то мы получили бы новый треугольник э. д. с. $ob'c'$, равный треугольнику abc и смещенный относительно последнего на величину E_0 . В действительности же приложенное напряжение сети фиксирует положение точек a , b и c на векторной диаграмме (рис. 13.10, в) и э. д. с. E_0 добавочного магнитного потока смещает нулевую точку O относительно точек a , b и c в положение O' , совпадающее с точкой a . Таким образом результирующая э. д. с. короткозамкнутой фазы стала равной нулю, а э. д. с. двух других фаз оказалась равными линейным напряжениям, что может повести к выходу из строя приемников энергии, рассчитанных на фазное значение э. д. с.

Однофазное к.з. — предельный случай несимметрии токов в системе звезда — звезда с нулем, и при несимметрии нагрузки искажения э. д. с. в фазах проявляется меньше.

Трехстержневой трансформатор. В таком трансформаторе со связанной магнитной системой добавочные магнитные потоки Φ_0 не могут замкнуться по магнитопроводу, так как во всех стержнях имеют одинаковые значения и направления в любой момент времени. Поэтому они подобно потокам третьей гармоники х. х. (см. рис. 13.9) вынуждены замыкаться по немагнитной среде. Так как этот путь имеет очень большое магнитное сопротивление, то добавочный магнитный поток Φ_0 и вызываемое им искажение фазных э. д. с. незначительны. Поэтому система звезда — звезда с нулем в трехстержневых трансформаторах находит относительно широкое применение, тогда как в групповом не применяется никогда. Если бы первичная обмотка трансформатора была соединена треугольником, то опасность возникновения добавочного потока отпала бы, так как из сети в первичной обмотке ток протекал бы только в той фазе, которая размещена на одном стержне с короткозамкнутой фазой вторичной обмотки, поэтому н.с. первичной и вторичной обмоток взаимно уравновешиваются.

§ 14.1. Назначение параллельной работы трансформаторов

При параллельной работе трансформаторы первичными обмотками включены на общую первичную сеть, а вторичными — на общую вторичную сеть. Параллельно могут быть включены два и более трансформаторов. Использование параллельной работы целесообразно при суточных или сезонных колебаниях нагрузки или когда нагрузка подстанции увеличивается постепенно, в течение ряда лет. Параллельная работа трансформаторов позволяет при снижении нагрузки отключать часть трансформаторов, уменьшая в них расход энергии на покрытие магнитных потерь. При этом более просто решается проблема резервирования, так как в случае выхода из строя какого-либо трансформатора остальные могут полностью или частично принять на себя его нагрузку. Когда нагрузка подстанции увеличивается постепенно, целесообразно устанавливать несколько трансформаторов последовательно по мере роста нагрузки.

Параллельное включение трансформаторов применяют также и в более сложных случаях, например, когда сеть НН (осветительная) имеет большую протяженность. Такую сеть питают несколькими трансформаторами в различных местах, что уменьшает падение напряжения в линии и дает возможность применять для такой линии провода меньшего поперечного сечения. Так как нагрузка обычно неравномерно распределена по длине линии, трансформаторы целесообразно размещать в главных пунктах нагрузки. Иногда используют совместную работу нескольких трансформаторов на общую сеть нагрузки, первичные обмотки которых включены в различные сети с различными напряжениями. Так, например, в местности, где много гидравлической энергии, сооружают несколько гидравлических электростанций и линий электропередач. В точках пересечения этих линий возникают пункты отбора энергии, поэтому электроснабжение определенного района производится несколькими электростанциями. Трансформаторы, включенные на одну и ту же сеть НН в нескольких ее пунктах со стороны ВН, включены в различные сети с различными первичными напряжениями.

Основная трудность, возникающая при параллельной работе трансформаторов, — обеспечение равномерного распределения нагрузки между ними. При включении на параллельную работу трансформаторов, одинаковых по мощности и конструкции, равномерное распределение нагрузки между ними достигается автоматически в силу симметрии всех параллельных цепей. Однако на практике приходится часто включать параллельно трансформаторы неодинаковых мощностей и различных в конструктивном отношении, и тогда равномерное распределение нагрузок между трансформаторами невозможно. При параллельном включении транс-

форматоров их вторичные обмотки образуют замкнутую цепь, в которой не должно возникать каких-либо неуравновешенных напряжений или э. д. с., т. е. сумма э. д. с. вторичных обмоток должна быть равна нулю.

§ 14.2. Условия включения трансформаторов на параллельную работу

При параллельном включении трансформаторов их первичные обмотки присоединяются параллельно к одним шинам, а вторичные — к другим (рис. 14.1). На схеме показано включение двух трансформаторов, но их число может быть и большим.

Для нормальной работы трансформаторов при их параллельном включении необходимо выполнение следующих условий:

1) равенство номинальных первичных и вторичных напряжений трансформаторов;

2) принадлежность трансформаторов к одинаковым группам;

3) равенство напряжений к. з., а также активных и реактивных составляющих напряжений к. з. трансформаторов.

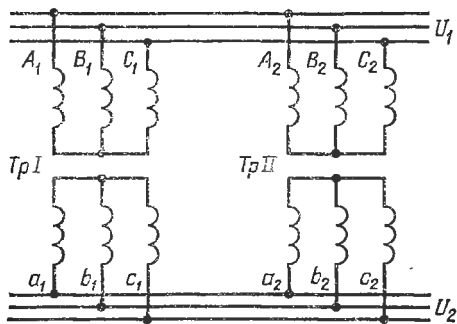


Рис. 14.1. Схема включения двух трехфазных трансформаторов на параллельную работу

Условия равенства номинальных первичных и вторичных напряжений. Это условие сводится к условию равенства коэффициентов трансформации параллельно работающим трансформаторов. При включении на параллельную работу обмотки трансформаторов должны быть соединены одноименными зажимами a_1 с a_2 и b_1 с b_2 и т. д., так чтобы индуктированные во вторичных обмотках э. д. с. находились бы в противофазе и их геометрическая сумма была равна нулю, тогда при включении трансформаторов не возникает никаких уравнивающих токов.

Если коэффициенты трансформации не равны, то не равны и э. д. с. вторичных обмоток, так что их геометрическая сумма не равна нулю: $E_{2I} + E_{2II} = \Delta E$, где E_{2I} и E_{2II} — э. д. с. вторичных обмоток первого и второго трансформаторов соответственно.

Под действием результирующей э. д. с. ΔE по обмоткам трансформаторов будут циркулировать уравнивающие токи $I_{ур}$. Суммарное напряжение вторичных обмоток уравнивается падением напряжений в сопротивлениях к.з. трансформаторов, приведенных ко вторичным обмоткам: $\Delta E = I_{ур}(Z_{KI} + Z_{KII})$, откуда $I_{ур} = \Delta E / (Z_{KI} + Z_{KII})$.

В мощных трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток больше, чем активные, так что $I_{ур}$ будет почти чисто реактивным. Уравнительный ток для трансформатора с большей вторичной э. д. с. будет индуктивным, уменьшающим напряжение вторичной обмотки этого трансформатора до напряжения вторичной сети U_2 ; для трансформатора с меньшей вторичной э. д. с. уравнительный ток будет емкостным, повышающим напряжение вторичной обмотки до напряжения вторичной сети U_2 .

Сопротивления к.з. трансформаторов малы, и даже при небольшом неравенстве коэффициентов трансформации $I_{ур}$ может оказаться значительно больше номинального, вследствие чего параллельное включение трансформаторов недопустимо. Относительное значение $I_{ур}$ определим на примере параллельной работы двух одинаковых однофазных трансформаторов с равными напряжениями короткого замыкания $u_k=5\%$ и э. д. с. вторичных обмоток, отличающимися друг от друга на $\Delta u=5\%$.

Номинальный и уравнительный токи соответственно будут:

$$I_{ном} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{ном}}{Z_k}; \quad I_{ур} = \frac{\Delta E}{100} \cdot \frac{U_{ном}}{2Z_k}.$$

Откуда $I_{ур}/I_{ном} = \Delta u/(2u_k) = 5/2 \cdot 5 = 0,5$, т. е. уравнительный ток составляет 50% от номинального.

Таким образом, при отсутствии нагрузки трансформаторы оказались нагруженными токами, равными половине номинального. Совершенно очевидно, что при таких условиях использовать полную мощность трансформаторов нельзя, так как при полной нагрузке они окажутся перегруженными и в случае продолжительной работы выйдут из строя. Если бы коэффициенты трансформации были отличными в большей мере, то уравнительный ток оказался бы еще большим. На практике допускается разница в коэффициентах трансформации не более 1%.

Условие принадлежности трансформаторов к одинаковым группам. Как было установлено ранее в зависимости от группы соединения обмоток трехфазного трансформатора, вектор вторичной линейной э. д. с. может быть сдвинут относительно вектора первичной на любой угол, кратный 30° . Первичные обмотки трансформаторов при их параллельной работе включены в общую сеть источника тока и независимо от групп соединения обмоток векторы линейных э. д. с. первичных обмоток будут совпадать по фазе.

Если выполнено второе условие, т. е. трансформаторы, включаемые на параллельную работу, принадлежат к одной группе, то векторы линейных э. д. с. вторичных обмоток совпадают по фазе и при включении трансформаторов никаких уравнительных токов не будет. Если эти трансформаторы принадлежат различным группам, то при совпадении векторов линейных э. д. с. первичных обмоток вектора линейных э. д. с. вторичных обмоток не совпадают по фазе и их геометрическая сумма не равна нулю, т. е. в этом случае при включении трансформаторов на параллельную работу появ-

ляются уравнивающие токи, которые значительно больше номинальных, и трансформаторы могут выйти из строя.

Положим, что мы включили на параллельную работу два одинаковых по своим параметрам трансформатора, имеющих различные группы соединения обмоток: первый трансформатор

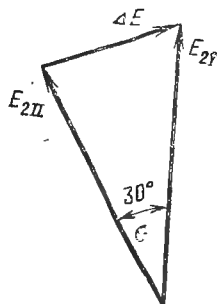
$Y/Y-0$, второй $Y/\Delta-11$. Тогда векторы линейных

э. д. с. вторичных обмоток трансформаторов E_{2I} и E_{2II} будут сдвиг

Рис. 14.2. Векторная диаграмма э. д. с. вторичных обмоток трансформаторов групп

$Y/Y-0$

$Y/\Delta-11$



нуты на угол 30° и геометрическая сумма линейных э. д. с. вторичных обмоток $\Delta E = 2U_n \sin 15^\circ = 0,52U_n$ (рис. 14.2), так что при включении трансформаторов будет очень большим уравнивающий ток:

$$I_{ур} = 0,52U_n / (Z_{кI} + Z_{кII}).$$

Если положить, что трансформаторы имеют одинаковую номинальную мощность, то при их включении на параллельную работу $I_{ур} = 0,25I_{кн}$, т. е. примерно в 5 раз больше номинального. Такой бросок тока может привести к аварии и вывести трансформатор из строя.

Условие равенства напряжений к.з. и их активных и реактивных составляющих. Напряжения к.з. и их активные и реактивные составляющие определяют распределение нагрузки между трансформаторами при их параллельной работе. При неравенстве напряжений к.з. нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется неравномерно, и трансформатор с меньшим напряжением нагружается сильнее, чем трансформатор с большим.

Для одной фазы трансформатора напряжение первичной обмотки $\dot{U}_1 = -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 Z_k$, где U_2' — приведенное напряжение вторичной обмотки; I_1 — ток первичной обмотки при нагрузке; Z_k — сопротивление к.з.

Если два трансформатора включены на параллельную работу, то напряжения как их первичных, так и вторичных обмоток одинаковы: $U_{1I} = U_{1II}$ и $U_{2I} = U_{2II}$. Поэтому падение напряжения в сопротивлениях обмоток должны быть также одинаковы: $I_I Z_{KI} = I_{II} Z_{KII}$ или $I_I/I_{II} = Z_{KII}/Z_{KI}$.

$$\text{Напряжение к.з. (\%)} \quad u_k = \frac{I_{\text{ном}} Z_K}{U_1} 100,$$

$$\text{откуда } Z_K = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_1}{I_{\text{ном}}},$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток трансформатора.

Таким образом получим следующее соотношение:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{u_{KII}}{u_{KI}} \cdot \frac{I_{\text{ном I}}}{I_{\text{ном II}}},$$

умножив и разделив обе части которого на общее для обоих трансформаторов номинальное напряжение, получим

$$\frac{U_1 I_I}{U_1 I_{II}} = \frac{P_I}{P_{II}} = \frac{u_{KII}}{u_{KI}} \cdot \frac{P_{\text{ном I}}}{P_{\text{ном II}}}.$$

Это выражение показывает, что нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется прямо пропорционально их номинальным мощностям и обратно пропорционально напряжениям к.з.

При неравенстве напряжений к.з. параллельная работа трансформаторов нежелательна, так как нельзя получить полной мощности этих трансформаторов. При номинальной нагрузке трансформатора с меньшим напряжением к.з. трансформатор с большим напряжением к.з. будет недогружен. Если же трансформатор с большим напряжением к.з. нагрузить номинальной мощностью, то тогда трансформатор с меньшим напряжением к.з. окажется перегруженным и длительно работать не сможет.

На практике, чтобы недоиспользование установленной мощности было малым, включают на параллельную работу такие трансформаторы, напряжения к.з. которых отличались бы от номинального значения не более чем на $\pm 10\%$.

Если, например, два трансформатора одинаковой номинальной мощности $P_{\text{ном I}} = P_{\text{ном II}} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ имеют напряжения к.з. $u_{KI} = 5,5\%$ и $u_{KII} = 6,5\%$, то недоиспользование мощности определится из следующих соображений. Трансформатор с меньшим напряжением к.з. нагружается в большей мере и его нагрузка не должна быть больше номинальной, так как нормально перегрузка не допускается. Следовательно, $P_I = P_{\text{ном I}} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Нагрузку трансформатора с большим напряжением находят из равенства: $P_{II}/P_I = u_{KI}/u_{KII}$, тогда $P_{II} = P_I \cdot u_{KI}/u_{KII} = 1000 \cdot 5,5/6,5 = 850 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Таким образом недоиспользована мощность $150 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, что составляет $150 \times 1000/2000 = 7,5\%$ установленной мощности.

При включении на параллельную работу трансформаторов различных мощностей нужно, чтобы трансформатор большей номинальной мощности имел меньшее напряжение к.з., чем трансформатор меньшей номинальной мощности. В этом случае недоиспользование установленной мощности будет меньше.

На параллельную работу трансформаторов оказывает влияние соотношение активных и реактивных составляющих напряжений к.з. Если составляющие напряжений к.з. не равны, то трансформаторы будут недоиспользованы.

При неравенстве активных и реактивных составляющих напряжения к.з. токи параллельно работающих трансформаторов I_I и I_{II} не совпадают по фазе и ток, отдаваемый ими приемнику электрической энергии $I_{ном}$, равен геометрической сумме токов трансформаторов (рис. 14.3), т.е. будет меньше арифметической суммы токов. Следовательно, при номинальных нагрузках трансформаторов ток, потребляемый приемником энергии, меньше суммы номинальных токов трансформаторов. Это объясняется тем, что для трансформаторов различных номинальных мощностей активные и реактивные составляющие напряжений к.з. различны: у трансформаторов большей мощности реактивное сопротивление и реактивная составляющая напряжения к.з. больше, а активное сопротивление и активная составляющая напряжения к.з. меньше, чем у трансформатора меньшей мощности. Поэтому требование равенства активных и реактивных составляющих напряжений к.з. делает нежелательным включение на параллельную работу трансформаторов, номинальные мощности которых различны более чем в 2,5 раза.

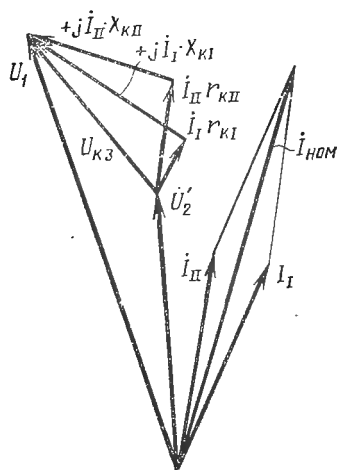


Рис. 14.3. Векторная диаграмма напряжений и токов при неравенстве активных и индуктивных сопротивлений двух трансформаторов

Глава 15

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

§ 15.1. Процессы при включении трансформаторов

В силовых трансформаторах ток х.х. составляет небольшую долю (5÷10%) номинального тока, а в трансформаторах малой мощности может достигать 30% и более от номинального тока. Однако при включении трансформатора в сеть возникают переходные процессы, при которых намагничивающий ток может резко возрасти.

Положим, что в сеть источника энергии переменного тока включен ненагруженный трансформатор, вторичная обмотка которого разомкнута. Если материал магнитопровода не насыщен, то магнитная проницаемость μ постоянна и между магнитным потоком и намагничивающим током существует пропорциональная зависимость. Если напряжение питающей сети u_1 синусоидально (рис. 15.1), то кривая магнитного потока Φ (в установившемся режиме) будет также синусоидальной функцией времени, отстаю-

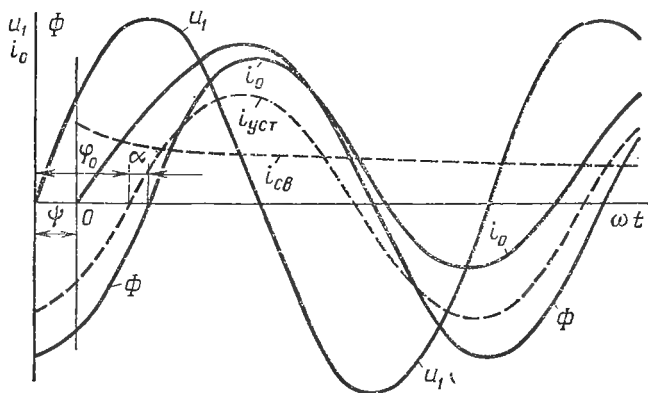


Рис. 15.1. Кривые приложенного напряжения, магнитного потока Φ , тока холостого хода i_0 и его установившегося $i_{уст}$ и свободного $i_{св}$ значения для трансформатора с ненасыщенным магнитопроводом

щей от кривой напряжения на $\pi/2$. Уравнение равновесия э. д. с. для первичной обмотки включаемого трансформатора будет

$$i_0 r_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} = u_1 = U_{1\max} \sin(\omega t + \psi), \quad (15.1)$$

где r_0 и L_0 — активное сопротивление и индуктивность трансформатора при х.х.; ψ — фаза включения напряжения.

Установившийся ток х.х. (по окончании переходного процесса)

$$i_{уст} = \frac{U_{1\max}}{\sqrt{r_0^2 + (\omega L_0)^2}} \sin(\omega t + \psi - \varphi_0), \quad (15.2)$$

где $\varphi_0 = \arctg(\omega L_0 / r_0)$ — фазный сдвиг установившегося тока х.х. относительно приложенного напряжения.

Таким образом кривая установившегося тока х.х. отстает по фазе от напряжения на угол φ_0 и опережает кривую магнитного потока Φ (за счет потерь в стали) на угол магнитного запаздывания α .

В момент включения трансформатора ток в его первичной обмотке так же, как и магнитный поток, не может мгновенно измениться от нуля до некоторого установившегося значения, соответ-

ствующего момента включения трансформатора. Следовательно, в момент включения ($t=0$) ток $i_0=0$. Представим ток х.х. в виде суммы токов: $i_0=i_{уст}+i_{св}$, где $i_{уст}$ — установившийся ток;

$$i_{св}r_0 + L_0 \frac{di_{св}}{dt} = 0 \quad (15.3)$$

— свободный ток переходного режима.

Решение этого уравнения имеет следующий вид:

$$i_{св} = i_{свt=0} e^{-r_0 t/L_0} = i_{свt=0} e^{-t/T}, \quad (15.4)$$

где $T=L_0/r_0$ — постоянная времени; $i_{св} t=0$ — свободный ток в момент включения ($t=0$).

Так как при $t=0$ и $i_0=0$, получим

$$i_{свt=0} = -i_{устt=0} = -\frac{U_{1\max}}{\sqrt{r_0^2 + (\omega L)^2}} \sin(\psi - \varphi_0). \quad (15.5)$$

В момент включения

$$i_0 = \frac{U_{1\max}}{\sqrt{r_0^2 + (\omega L_0)^2}} [\sin(\omega t + \psi - \varphi_0) - \sin(\psi - \varphi_0)e^{-t/T}]. \quad (15.6)$$

На рис. 15.1 показаны кривые токов $i_{св}$ и i_0 , из которых видно, что в зависимости от момента включения трансформатора свободный ток $i_{св}$ принимает различные значения. Если трансформатор включают в момент $\psi = \varphi_0$, то $i_0 t=0 = 0$ и свободный ток отсутствует, ток х.х. будет равен установившемуся значению. Если трансформатор включают в момент $\psi = \varphi_0 \mp \pi/2$, то свободный ток при включении равен наибольшему значению — амплитуде установившегося тока. Тогда через половину периода ток при включении достигнет значения, примерно вдвое большего амплитуды установившегося тока.

Следовательно, при включении трансформатора с ненасыщенным сердечником в зависимости от момента включения наибольший бросок тока может принимать значения от одно- до двукратной амплитуды установившегося тока х.х.

Иные значения бросков токов будут при включении трансформатора с насыщенным сердечником. Магнитная проницаемость μ и индуктивность трансформатора при х.х. L_0 не постоянны, и уравнение равновесия э. д. с. первичной обмотки будет иметь следующий вид:

$$i_0 r_0 + w_1 (d\Phi/dt) = u_1 = U_{1\max} \sin(\omega t + \psi), \quad (15.7)$$

откуда

$$d\Phi = \frac{U_{1\max}}{w_1} \sin(\omega t + \psi) dt - \frac{i_0 r_0}{w_1} dt.$$

Интегрируя это выражение в пределах от 0 до t , получим

$$\Phi = \frac{U_{1\max}}{\omega w_1} \cos(\omega t + \psi) - \int_0^t \frac{i_0 r_0}{w_1} dt + C.$$

При включении трансформатора в сеть в его сердечнике может быть некоторый остаточный магнитный поток $\Phi_{ост}$. В этом случае постоянная интегрирования C будет равна

$$C = -\frac{U_{1max}}{\omega\omega_1} \cos \psi \pm \Phi_{ост}$$

и окончательно магнитный поток в сердечнике трансформатора определится следующим выражением:

$$\Phi = \frac{U_{1max}}{\omega\omega_1} \cos(\omega t + \psi) - \frac{U_{1max}}{\omega\omega_1} \cos \psi - \int_0^t \frac{i_0 r_0}{\omega_1} dt \pm \Phi_{ост}. \quad (15.8)$$

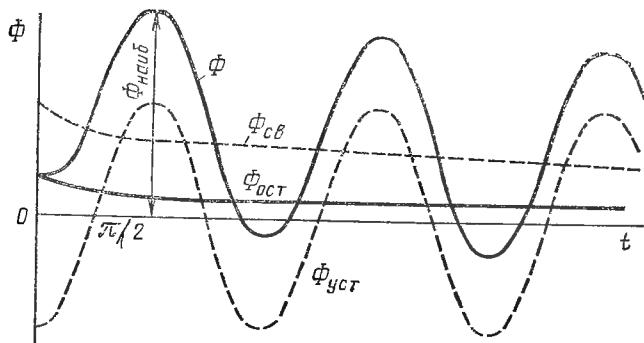


Рис. 15.2. Кривая магнитного потока при наихудших условиях включения трансформатора

В правой части этого выражения (15.8) первое слагаемое представляет собой магнитный поток при установившемся режиме $\Phi_{уст}$, второе слагаемое — свободный магнитный поток при включении трансформатора $\Phi_{св}$, третье слагаемое — уменьшение свободного потока во времени. Кривые Φ , $\Phi_{св}$, $\Phi_{уст}$ и $\Phi_{ост}$ показаны на рис. 15.2 для наиболее неблагоприятного момента включения. Если же включение трансформатора произошло в момент $\psi = \pi/2$, то магнитный поток оказался бы равным установившемуся значению ($\Phi = \Phi_{уст}$) и свободный магнитный поток отсутствовал ($\Phi_{св} = 0$). Если бы включение трансформатора произошло в момент $\psi = 0$, то свободный магнитный поток будет наибольшим и равным амплитуде потока установившегося режима, так что магнитный поток в сердечнике трансформатора через половину периода после включения его в сеть примет примерно вдвое большее значение, чем амплитуда потока установившегося режима, т. е. $\Phi_{наиб} = 2\Phi_{max\ уст} + \Phi_{ост}$.

Для возбуждения магнитного потока $\Phi_{наиб}$ в насыщенном магнитопроводе трансформатора намагничивающий ток $I_{\mu\ наиб}$ может достигать весьма большого значения, в десятки раз превышающего установившегося значения этого тока $I_{\mu\ ном}$ (рис. 15.3).

Бросок тока холостого хода при включении трансформатора кратковремен, но его защита реагирует на этот бросок, и трансформатор может быть отключен. Если в сеть включается нагруженный трансформатор, то бросок тока значительно возрастает.

Для уменьшения бросков тока при включении трансформаторов наиболее часто используют пусковое сопротивление, включаемое между питающей сетью и первичной обмоткой трансформатора. За счет падения напряжения в пусковых сопротивлениях напряжение на первичной обмотке трансформатора понижается, уменьшая магнитный поток в сердечнике. Если же сердечник трансформатора не насыщен, то ток включения невелик и не превышает удвоенного значения амплитуды установившегося тока x .

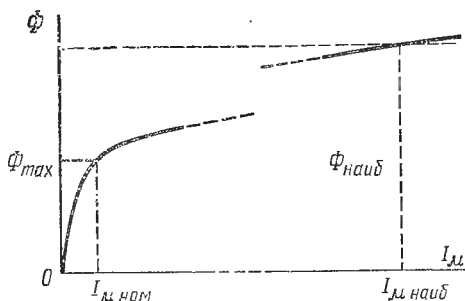


Рис. 15.3. Наибольший бросок тока при включении трансформатора

§ 15.2. Процессы при внезапных коротких замыканиях трансформаторов

В эксплуатационных условиях короткие замыкания трансформаторов возникают из-за различных неисправностей системы или как следствия предшествовавших им нарушений нормальной работы. Короткие замыкания представляют для трансформатора большую опасность, так как при этом возникают очень большие токи, резко повышающие температуру обмоток, что угрожает целостности изоляции. Гораздо больше токи к.з. угрожают целостности трансформатора в механическом отношении, так как при больших токах в обмотках создаются большие электромагнитные силы, действующие на провода обмоток и деформирующие их, что может повести к аварии.

В зависимости от момента короткого замыкания броски тока могут достигать от одного до двукратного значения амплитуды установившегося тока к.з. При коротком замыкании магнитный поток в сердечнике вдвое меньше, чем при холостом ходе и работе под нагрузкой трансформатора, что можно видеть из упрощенной эквивалентной схемы (см. рис. 12.5, а). Следовательно, при коротком замыкании сердечник трансформатора не насыщен и будут постоянными как магнитная проницаемость μ , так и индуктивность короткого замыкания $L_{к.з.}$ трансформатора. Поэтому уравнение равновесия э. д. с. для первичной обмотки трансформатора может быть записано в следующем виде:

$$i_k r_k + L_k (di_k / dt) = u_1 = U_{1\max} \sin(\omega t \pm \psi), \quad (15.9)$$

где $r_k = r_1 + r_2'$ и $L_k = L_1 + L_2'$ — активное сопротивление и индуктивность к.з. трансформатора; ψ — угол, определяющий мгновенное значение напряжения в момент к.з.

Установившийся ток к.з.

$$i_{k.z.уст} = \frac{U_{1max}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k), \quad (15.10)$$

где $\varphi_k = \arctg(\omega L_k / r_k)$ — угол короткого замыкания.

Ток короткого замыкания i_k может быть представлен суммой установившегося $i_{k.уст}$ и свободного $i_{k.св}$ токов: $i_k = i_{k.уст} + i_{k.св}$. При работе трансформатора ток в его обмотках был много меньше тока к.з., так что в начальный момент можно принять ток равным нулю (при $t=0$, $i_k=0$), т. е.

$$i_{k.св t=0} = -i_{k.уст t=0} = -\frac{U_{1max}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}} \sin(\psi - \varphi_k). \quad (15.11)$$

Из уравнения $i_{k.св} r_k + L_k di_{k.св} / dt = 0$ найдем свободный ток:

$$i_{k.св} = i_{k.св t=0} e^{-r_k t / L_k} = -\frac{U_{1max}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}} \sin(\psi - \varphi_k) e^{-t/T_k}, \quad (15.12)$$

где $T_k = L_k / r_k$ — постоянная времени.

Ток короткого замыкания

$$i_k = \frac{U_{1max}}{\sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}} [\sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - \sin(\psi - \varphi_k) e^{-t/T_k}]. \quad (15.13)$$

Кривые токов i_k , $i_{k.уст}$ и $i_{k.св}$ имеют такой же вид, как и кривые подобных токов при холостом ходе (см. рис. 15.1).

Таким образом при внезапном коротком замыкании в момент $\psi = \varphi_k$ свободный ток равен нулю ($i_{k.св} = 0$) и ток к.з. принимает установившееся значение ($i_k = i_{k.уст}$), так что наибольший бросок равен амплитуде установившегося тока к.з.; при замыкании в момент $\psi = \varphi_k \pm \pi/2$ наибольший бросок тока окажется вдвое большим амплитуды установившегося тока к.з. Поэтому конструкция обмоток рассчитывается на такую механическую прочность, которая противостояла бы силам, возникающим при наибольших мгновенных бросках тока, равных удвоенной амплитуде установившегося тока к.з.

§ 15.3. Перенапряжения в трансформаторах

В условиях нормальной работы трансформатора как между отдельными витками и катушками обмоток, так и между обмотками и заземленным магнитопроводом действуют синусоидальные напряжения номинальной частоты и амплитуды, которые неопасны для трансформаторов, если он правильно рассчитан. Обмотки

трансформатора состоят из большого числа витков с одинаковыми индуктивными и активными сопротивлениями, поэтому приложенное напряжение равномерно распределяется вдоль обмотки (рис. 15.4). При заземленном конце обмотки напряжения, действующие между ее витками и заземленным магнитопроводом, изменяются равномерно (прямая 1), уменьшаясь по мере приближения к концу обмотки. При изолированной нейтрали все точки обмотки находятся под одним и тем же напряжением относительно заземленного магнитопровода (прямая 2).

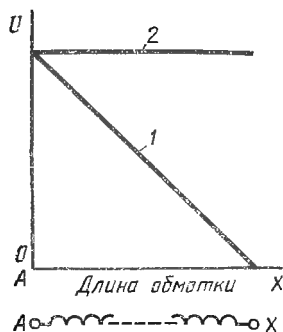


Рис. 15.4. Распределение напряжения по длине обмотки при нормальном режиме работы в случае замедленного (1) и изолированного (2) конца обмотки

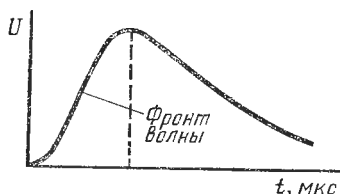


Рис. 15.5. Примерная форма импульса перенапряжения при грозовых разрядах

Однако в процессе эксплуатации трансформатор подвергается воздействию напряжений, превосходящих номинальное напряжение по амплитуде и имеющих другую частоту и форму кривой. В большинстве случаев грозовые разряды создают в линии перенапряжения в виде кратковременных импульсов, причем амплитуда и форма импульса перенапряжения, проникающего в обмотки трансформатора, в значительной степени зависит от дальности атмосферного разряда, защиты подстанции, подходов к ней и др. Примерная форма импульса перенапряжения показана на рис. 15.5. Увеличение напряжения от нуля до максимума (фронт волны) происходит за очень короткий отрезок времени, измеряемый часто десятками долями микросекунды. Волну с крутым фронтом можно рассматривать как четверть периода периодического напряжения очень высокой частоты. В этом случае трансформатор ведет себя не так, как при нормальной работе. Помимо активных и индуктивных сопротивлений обмоток трансформатора имеются емкостные связи, упрощенная схема которых для одной какой-либо обмотки показана на рис. 15.6. На этой схеме C_K — емкость между отдельными катушками (продольная емкость), а C_B — емкость между катушками и заземленными частями (поперечная емкость на землю). Емкости

между катушками C_K соединены последовательно, и продольная емкость начального витка относительно конечного при n катушках будет: $C_d = C_K/n$. Емкости катушек относительно заземленных частей соединены параллельно, и результирующая поперечная емкость при n катушках на землю (поперечная емкость) будет: $C_q = nC_3$.

Все емкостные связи трансформатора можно заменить общей (входной) емкостью $C = \sqrt{C_d C_q} = \sqrt{C_K C_3}$. Входная емкость обуславливает емкостное сопротивление $X_C = 1/(2\pi f C)$.

При нормальной работе частота тока мала и емкостное сопротивление обмоток трансформатора настолько велико по сравнению

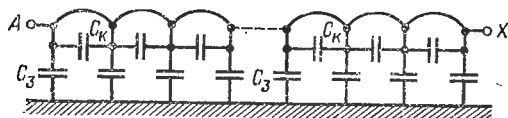


Рис. 15.6. Емкостные связи трансформатора

с индуктивным X_L и активным r сопротивлениями, что ток практически протекает по обмотке. По мере увеличения частоты соотношение между индуктивным и емкостным сопротивлениями изменяется: X_L увеличивается, а X_C уменьшается. При очень большой

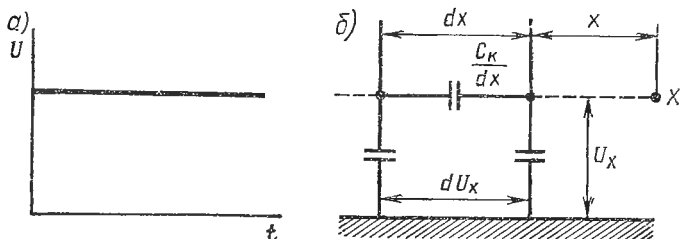


Рис. 15.7. Волна перенапряжения прямоугольной формы (а) и элемент обмотки трансформатора (б)

частоте индуктивное сопротивление будет большим ($X_L = 2\pi f L$), так что ток практически протекает только через емкость. На рис. 15.6 показана обмотка ВН, а обмотку НН можно приближенно считать заземленной, так как она связана с магнитопроводом малыми емкостными сопротивлениями (малы изоляционные промежутки).

Так как токи протекают через поперечные емкости C_3 , то в продольных емкостях C_K будут различные токи, уменьшающиеся по мере приближения к концу обмотки. Поэтому распределение напряжения вдоль обмотки будет неравномерным, и степень неравномерности зависит от соотношения емкостей C_3 и C_K .

Распределение напряжения в обмотках трансформатора определим при набегании волны перенапряжения прямоугольной формы (рис. 15.7, а). Выделим элемент обмотки длиной dx (рис. 15.7, б) на расстоянии x от конца обмотки X. Емкость этого элемента обмотки на землю будет $C_3 dx$, емкость между концами элемента —

C_K/dx , напряжения относительно земли (магнитопровода) — U_x , напряжение на участке dx — dU_x .

При любой частоте ω получим следующие уравнения:

$$dU_x = \frac{1}{\omega C_K} i_x dx; \quad U_x = \frac{1}{\omega C_K} \cdot \frac{di_x}{dx}, \quad (15.14)$$

откуда

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} - \frac{C_3}{C_K} U_x = 0. \quad (15.15)$$

Частное решение этого уравнения имеет вид $U_x = Ae^{\alpha x}$.

Подставляя это значение в (15.15), получим

$$\alpha^2 - C_3/C_K = 0, \text{ откуда } \alpha = \pm \sqrt{C_3/C_K}.$$

Полное решение уравнения (15.15) имеет вид

$$U_x = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x}.$$

Постоянные интегрирования определяют из граничных условий, которые будут различны для случаев заземленного и изолированного концов обмотки. При заземленном конце обмотки, считая ее длину равной единице, имеем $U_x = 0$ при $x = 0$ и $U_x = 2U$ при $x = 1$, так как от начала обмотки прямоугольная волна перенапряжения отражается с двойной амплитудой.

Используя граничные условия, получим решение уравнения (15.15):

$$U_x = U(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x})/(e^{\alpha} - e^{-\alpha}) = U \operatorname{sh} \alpha x / \operatorname{sh} \alpha. \quad (15.16)$$

Распределение напряжения по длине обмотки при заземленном конце ее для различных значений α показано на рис. 15.8, а.

Для незаземленного конца обмотки имеем $i_x = 0$ при $x = 0$ и $U_x = U$ при $x = 1$. При $x = 0$ имеем $i_x/(\omega C_K) = dU_x/dx = \alpha A - \alpha B = 0$, и при $x = 1$ получим $A = U/(e^{\alpha} + e^{-\alpha})$.

Для изолированного конца обмотки распределение напряжения (рис. 15.8, б) по длине обмотки определяется зависимостью следующего вида:

$$U_x = U(e^{\alpha x} + e^{-\alpha x})/(e^{\alpha} + e^{-\alpha}) = U \operatorname{ch} \alpha x / \operatorname{ch} \alpha. \quad (15.17)$$

Обычно в трансформаторах $\alpha = 5-15$, так что распределение напряжения вдоль обмотки крайне неравномерно и почти одинаково для обмоток с заземленной и изолированной нейтралью.

Кривые распределения напряжения показывают, что при перенапряжениях наибольшей опасности подвергается изоляция начальных катушек, так как наибольшая часть напряжения в на-

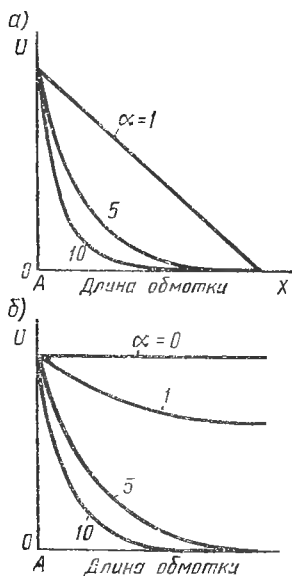


Рис. 15.8. Распределение напряжения вдоль обмотки при перенапряжениях для различных значений α

чальные моменты приходится на эти катушки. В трансформаторах с номинальным напряжением обмоток до 35 кВ для защиты от атмосферных перенапряжений применяют усиленную изоляцию провода (до 1,35 мм на обе стороны) для первой и второй катушек в начале и в конце обмотки, а также увеличивают вентиляционные каналы между ними. В трансформаторах с напряжением обмоток 110 кВ и выше применяют емкостную компенсацию. Для этого включают добавочные емкости, выполненные в виде экранов особой формы, окружающих обмотку ВН. Емкости C_3' , C_3'' и др.

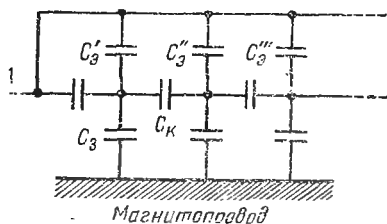


Рис. 15.9. Схема емкостной компенсации

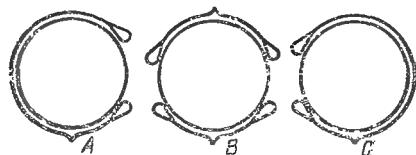


Рис. 15.10. Схема расположения емкостных витков трехфазного трансформатора

(рис. 15.9) подбирают таким образом, чтобы токи в продольных емкостях C_K были одинаковыми и, следовательно, начальное распределение перенапряжения — равномерным.

Выравнивание электрического поля у концов достигается применением емкостных колец, являющихся разомкнутыми шайбообразными электростатическими экранами. Емкостное кольцо изготовляют из тонкой медной ленты шириной 20—30 мм, завернутой в кабельную бумагу и намотанной в два слоя (бифилярно) на электрокартонную шайбу с округленными краями. Емкостные кольца снижают максимальные напряжения, возникающие между начальными и концевыми катушками обмоток, но не устраняют необходимость их усиленной изоляции.

Дальнейшего уменьшения больших напряжений на начальных катушках добиваются применением емкостных витков, являющихся также электростатическими экранами. Их выполняют в виде разомкнутых металлических колец, охватывающих несколько первых катушек обмотки и соединенных с ее линейными концами (рис. 15.10). Экранирующие витки с усиленной изоляцией (5 мм на сторону) выполняют из того же провода, что и витки катушек.

Витки, экранирующие несколько катушек обмотки, в начале (а также в конце) соединяются параллельно. Все начала экранирующих витков, отводы обмоток и емкостного кольца 1 соединяют на общую гребенку. Для уменьшения экранирующих емкостей витки 3 катушек, более удаленных от начала 2, располагают на большем расстоянии от катушек обмотки, чем начальные витки. Схема расположения емкостных витков и кольца по высоте обмотки показана на рис. 15.11.

Опасные по величине напряжения для начальных катушек обмоток возникают также при резком спаде напряжения, называемом срезом волны. Срез волны (кривая 3 на рис. 15.12) возникает в случае перекрытия линии и его можно рассматривать как наложение двух волн разных знаков (кривые 1 и 2), следующих друг за другом. При срезе волны происходит новое распределение потен-

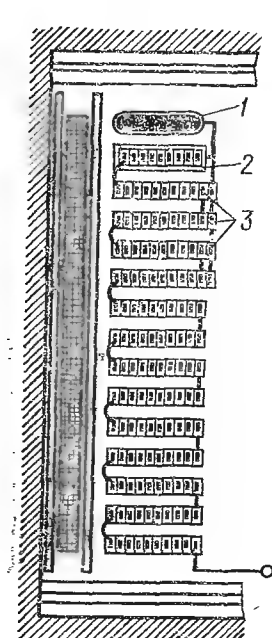


Рис. 15.11. Схема расположения емкостных витков и емкостного кольца по высоте обмотки

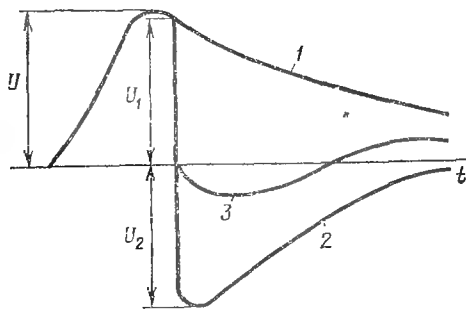


Рис. 15.12. Образование среза волны 3 в результате наложения волн 1 и 2 различных знаков

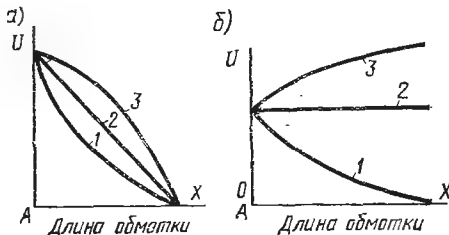


Рис. 15.13. Распределение напряжения по длине обмотки в начальный момент (1), конечный момент (2) и при переходе от начального момента к конечному

циалов под действием волны с амплитудой $U_1 + U_2$, которая зависит от места среза и часто бывает больше амплитуды перенапряжения U .

Раньше мы установили, что начальное распределение напряжения (кривая 1 на рис. 15.13, а) и конечное его распределение (кривая 2) по длине обмотки с заземленной нейтралью различны. Примерное распределение напряжения вдоль обмотки с заземленной нейтралью в момент, следующий за начальным при колебательных процессах, показывает кривая 3. В этом случае наибольшее напряжение приходится на последний заземленный виток, т. е. наиболее опасен пробой изоляции у последних витков. В дальнейшем колебания будут вызывать изменение распределения напряжения вдоль обмотки. Это распределение в любой момент времени от начального до конечного представляется некоторой кривой,

лежащей между 1 и 2. Таким образом, опасность пробоя изоляции за счет колебательных процессов существует для любого витка обмотки.

В трансформаторе с изолированной нейтралью (незаземленный конец обмотки) распределение напряжения по длине обмотки в начальный и конечный моменты показано на рис. 15.13, б. Колебания

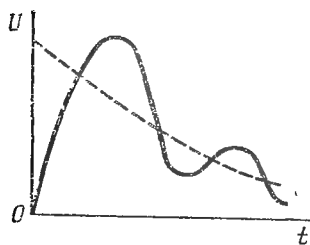


Рис. 15.14. Изменение напряжения точки обмотки относительно земли при колебательном процессе

напряжения при переходе от начального распределения к конечному происходят в пределах, определяемых кривыми 1 и 3. В этом случае колебания напряжения происходят в более широких пределах, чем при заземленной нейтрали обмотки. Это обстоятельство — существенный недостаток систем с изолированной нейтралью.

Процесс проникновения волны перенапряжения можно рассматривать как постепенный переход от начального к конечному распределению напряжения. Так как трансформатор представляет собой систему различным образом соединенных между собой индуктивностей и емкостей, образующих резонансные контуры, то переход от начального распределения напряжения к конечному сопровождается колебательными процессами. Эти колебания имеют затухающий характер за счет активного сопротивления обмоток (рис. 15.14), однако они могут привести к тому, что напряжения между отдельными точками (катушками) обмотки окажутся больше амплитуды перенапряжения и во много раз превзойдут по величине нормальное рабочее напряжение между ними. В результате этого в трансформаторе возможны пробой и перекрытия (поверхностные разряды) изоляции.

В трансформаторах с емкостными витками и кольцами электромагнитные колебания при переходных процессах выражены значительно слабее. Такие трансформаторы называются *грозоупорными* или *нерезонирующими*, так как у них практически устранена опасность возникновения значительных резонансных колебаний в обмотках при воздействии периодических затухающих волн.

Глава 16

ТРАНСФОРМАТОРЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТИПОВ

§ 16.1. Автотрансформаторы

Автотрансформатором называют статический электромагнитный аппарат, имеющий одну обмотку, часть которой принадлежит одновременно первичной и вторичной сети. Принципиальная схема понижающего автотрансформатора показана на рис. 16.1. Первичное напряжение подведено к зажимам А—Х первичной обмотки с

числом витков ω_1 . Вторичной обмоткой является часть первичной $a—X$ с числом витков ω_2 . Пренебрегая падением напряжения в сопротивлениях первичной обмотки от тока х.х., мы можем определить напряжения первичной и вторичной обмоток: $U_1 \approx E_1 = 4,44\omega_1 f\Phi$; $U_2 = E_2 = 4,44\omega_2 f\Phi$.

Отношение напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе называется *коэффициентом трансформации автотрансформатора*, т. е.

$$U_1/U_2 = \omega_1/\omega_2 = k.$$

Если вторичную обмотку автотрансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии, то во вторичной цепи потечет ток. Пренебрегая потерями энергии в автотрансформаторе, мощность, потребляемую автотрансформатором из сети, можно принять равной мощности, отдаваемой во вторичную сеть: $P = U_1 I_1 = U_2 I_2$. Откуда $I_1/I_2 = \omega_2/\omega_1 = 1/k$.

Таким образом, основные соотношения трансформатора остаются без изменения в автотрансформаторах.

Из условия постоянства магнитного потока при неизменном напряжении сети U_1 мы можем записать уравнение равновесия намагничивающих сил автотрансформатора: $I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 = I_0 \omega_1$.

По части обмотки $a—X$ с числом витков ω_2 протекает ток I_{12} , равный геометрической сумме токов первичной и вторичной цепи: $I_{12} = I_1 + I_2$.

Если пренебречь током х.х. за малостью, то можно считать, что токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе на 180° , и их геометрическая сумма равна арифметической разности, т. е. $I_{12} = I_2 - I_1 = I_2(1 - 1/k)$. В понижающем автотрансформаторе ток I_{12} совпадает по направлению с током I_2 , в повышающем — направлен противоположно.

Конструктивно автотрансформатор отличается от обычного трансформатора только электрическим соединением между обмотками. Его преимуществом перед трансформатором той же полезной мощности является меньший расход активных материалов (меди и стали), потери энергии и изменение напряжения при изменениях нагрузки, высокий к. п. д. Вес меди автотрансформатора примерно в $k/(k-1)$ раз меньше веса трансформатора при одинаковых плотностях тока. Это объясняется тем, что у трансформатора на сердечнике имеется две обмотки — первичная с числом витков ω_1 , поперечное сечение провода которой рассчитано на ток I_1 , и вторичная с числом витков ω_2 , поперечное сечение провода которой рассчитано на ток I_2 . У автотрансформатора также две обмотки, но одна из них (часть $A—a$) имеет число витков $(\omega_1 - \omega_2)$ из провода, поперечное сечение которого рассчитано на ток I_1 , а другая (часть $a—X$) имеет число витков ω_2 и сечение ее провода рассчитано на разность токов $I_2 - I_1 = I_{12}$. Поперечное сечение и масса стали

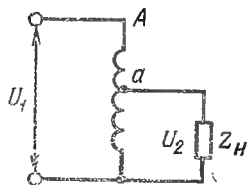


Рис. 16.1. Принципиальная схема понижающего автотрансформатора

магнитопровода трансформатора также меньшие сечения и массы стали магнитопровода трансформатора. Это объясняется тем, что в трансформаторе энергия из первичной сети во вторичную передается магнитным путем вследствие электромагнитной связи между обмотками. В автотрансформаторе энергия из первичной сети во вторичную частично передается за счет электрического соединения первичной и вторичной сети, т. е. электрическим путем.

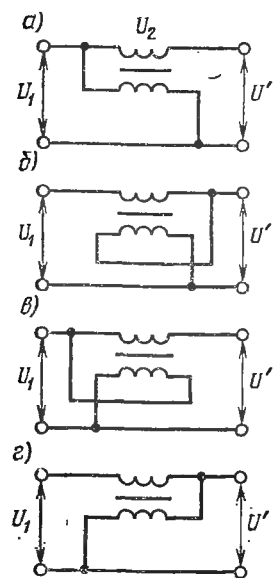


Рис. 16.2. Схема включения двухобмоточного трансформатора по автотрансформаторной схеме

электрической связи между сетью источника и приемника энергии делает невозможным применение автотрансформатора в случае, когда приемник энергии имеет заземленный полюс (в выпрямительных устройствах).

Очень часто автотрансформаторы применяют в установках высокого и низкого напряжения в случаях, когда возникает необходимость изменения напряжения на каком-либо участке сети в небольших пределах (до 50—100%). Применение обычных трансформаторов в этом случае нецелесообразно по экономическим соображениям. Включение двухобмоточного трансформатора по автотрансформаторной схеме (рис. 16.2) дает возможность повысить или понизить напряжение в сети. Первичная обмотка трансформатора подключена к сети с напряжением U_1 , а вторичная с напряжением U_2 — последовательно в сеть с тем, чтобы напряжение этой обмотки добавлялось к напряжению U_1 и в сумме с ним создавало требуемое напряжение на выходе. При этом изоляция

В процессе передачи этой части энергии магнитный поток не участвует, поэтому электромагнитная мощность у автотрансформатора меньше, чем у трансформатора. При активной нагрузке полезная мощность автотрансформатора: $P_2 = U_2 I_2$. Имея в виду, что $I_2 = I_1 + I_{12}$, получим $P_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = P_{эл} + P_{эм}$, где $P_{эл}$ — мощность, передаваемая за счет электрической связи; $P_{эм}$ — электромагнитная мощность автотрансформатора, определяющая необходимый магнитный поток, сечение и массу стали магнитопровода. Эта мощность является расчетной или габаритной мощностью автотрансформатора.

Достоинства автотрансформаторов будут выражены тем больше, чем ближе коэффициент трансформации к единице. Поэтому автотрансформаторы применяют при небольших коэффициентах трансформации ($k = 1—2$).

Недостатки автотрансформаторов перед трансформаторами: малое сопротивление короткого замыкания, что обуславливает большую кратность тока к. з., возможность попадания ВН в сеть НН за счет электрической связи между этими сетями. Наличие

вторичной обмотки должна быть рассчитана на выходное напряжение U' , а не на напряжение U_2 , как в обычном трансформаторе. Полезная или проходная мощность автотрансформатора $I_2 U' = (U_1 + U_2) I_2$, тогда как расчетная или габаритная мощность равна $U_2 I_2$, т. е. расчетная мощность значительно меньше полезной.

Возможно выполнение четырех схем включения автотрансформатора, из которых две (рис. 16.2, *а* и *б*) применяются для повышения напряжения в сети ($U' > U$) и две (рис. 16.2, *в* и *г*) — для понижения. В последних двух схемах первичная обмотка имеет противоположное включение по сравнению со схемами, изображенными на рис. 16.2, *а* и *б*. Следовательно, вторичное напряжение U_2 изменяет свою фазу, т. е. окажется направленным встречно приложенному напряжению U_1 , так что напряжение на выходе U' понижается.

Автотрансформаторы применяют для связи высоковольтных сетей с близкими по величине напряжениями, например 154 и 220 кВ, 220 и 400 кВ, для пуска синхронных и асинхронных двигателей переменного тока. В трехфазных сетях применяют трехфазные автотрансформаторы, обмотки которых могут быть соединены в треугольник или звезду, последние наиболее распространены. В этом случае нулевую точку либо заземляют, либо присоединяют к нейтральному проводу.

§ 16.2. Трехобмоточные трансформаторы

Если необходимо получить не одно напряжение, то вместо требующихся для этого нескольких отдельных двухобмоточных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации может быть использован один многообмоточный. Это позволяет упростить и удешевить трансформаторную подстанцию.

Процессы, происходящие в двухобмоточном трансформаторе, можно обобщить и вывести общие уравнения, описывающие процессы, происходящие в многообмоточном. Пусть трансформатор имеет n обмоток. Для такого n -обмоточного трансформатора справедливы уравнения равновесия э. д. с. и уравнение равновесия н.с. Обозначим через $I_1, I_2, \dots, I_n$ токи, протекающие в обмотках трансформатора, а через $w_1, w_2, \dots, w_n$ числа витков соответствующих обмоток. Согласно закону магнитного равновесия

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 + I_3 w_3 + \dots + I_n w_n = I_0 w_1,$$

т. е. сумма н.с. всех обмоток равна н.с. холостого хода. Намагничивающая сила первичной обмотки создает магнитный поток в магнитопроводе и компенсирует размагничивающее действие токов всех остальных обмоток.

Рассмотрим трехобмоточные трансформаторы, имеющие широкое распространение. Опыт холостого хода трехобмоточного трансформатора, когда обе вторичные обмотки разомкнуты, ничем не отличается от опыта холостого хода обычного двухобмоточного

трансформатора и дает возможность определить ток х.х. I_0 , потери х.х. P_0 и коэффициенты трансформации. Для данного случая мы получим два коэффициента трансформации k_{12} и k_{13} между первой и второй и между первой и третьей обмотками трансформатора (по общему правилу): $k_{12}=E_1/E_2=\omega_1/\omega_2$; $k_{13}=E_1/E_3=\omega_1/\omega_3$. По этим коэффициентам можно определить третий k_{23} между второй и третьей обмотками: $k_{23}=E_2/E_3=\omega_2/\omega_3=k_{13}/k_{12}$.

Для определения параметров короткого замыкания производят три опыта короткого замыкания, а именно:

- а) между обмотками 1 и 2 при разомкнутой обмотке 3;
- б) между обмотками 1 и 3 при разомкнутой обмотке 2;
- в) между обмотками 2 и 3 при разомкнутой обмотке 1.

Пусть r_1, r_2, r_3 — активные сопротивления; X_1, X_2, X_3 — индуктивные сопротивления соответствующих обмоток.

В двухобмоточных трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток определяются потоками рассеяния этих же обмоток. В трехобмоточных трансформаторах индуктивные сопротивления обмоток определяются некоторыми эквивалентными потоками рассеяния, слагающимися из потока рассеяния данной обмотки и потоков рассеяния двух других обмоток.

Обозначим через r'_2, r'_3, X'_2, X'_3 активные и индуктивные сопротивления обмоток 2 и 3, приведенные к первичной, через $r_{k12}, r_{k13}, r_{k23}, X_{k12}, X_{k13}, X_{k23}$ активные и индуктивные сопротивления к.з., полученные из трех опытов короткого замыкания.

Активные сопротивления к. з. $r_{k12}=r_1+r_2k_{12}^2$; $r_{k13}=r_1+r_3k_{13}^2$; $r_{k23}=r_2+r_3k_{23}^2$. В последнем равенстве, заменив k_{23} через дробь k_{13}/k_{12} , получим $r_{k23}k_{12}=r'_{k23}=r_2k_{12}^2+r_3k_{13}^2$, где r'_{k23} — активное сопротивление, полученное из опыта короткого замыкания между обмотками 2 и 3, приведенное к первичной обмотке. Из записанных трех уравнений мы определим три неизвестных сопротивления:

$$r_1=(r_{k12}+r_{k13}-r'_{k23})/2; \quad r_2=(r_{k12}+r'_{k23}-r_{k13})/2;$$

$$r'_3=(r_{k13}+r'_{k23}-r_{k12})/2.$$

Совершенно аналогично получим выражения для индуктивных сопротивлений обмоток 1, 2, 3:

$$X_1=(X_{k12}+X_{k13}-X'_{k23})/2; \quad X'_2=(X_{k12}+X'_{k23}-X_{k13})/2;$$

$$X'_3=(X_{k13}+X'_{k23}-X_{k12})/2,$$

где X'_{k23} — индуктивное сопротивление, полученное из опыта короткого замыкания между обмотками 2 и 3, приведенное к первичной обмотке.

Для трехобмоточного трансформатора, так же как и для двухобмоточного, мы можем построить эквивалентную схему (рис. 16.3). Трехобмоточные трансформаторы, имеющие одну первичную и две вторичные обмотки, наиболее широко распространены. Его характерной особенностью является взаимное влияние между вторичными обмотками. Если изменится нагрузка в одной из обмоток (на-

пример, второй), то напряжение изменяется как в этой обмотке (U_2), так и в другой (U_3). Это объясняется тем, что изменение тока в какой-либо одной вторичной обмотке вызывает соответствующее изменение тока в первичной обмотке и вследствие изменения падения напряжения в полном сопротивлении первичной обмотки меняются как э. д. с., так и напряжения всех вторичных обмоток.

В конструктивном отношении трехобмоточные трансформаторы подобны двухобмоточным. На магнитопроводе трехобмоточного трансформатора помещают три обмотки — высшего (ВН), среднего (СН) и низшего напряжений (НН). На стержне магнитопровода

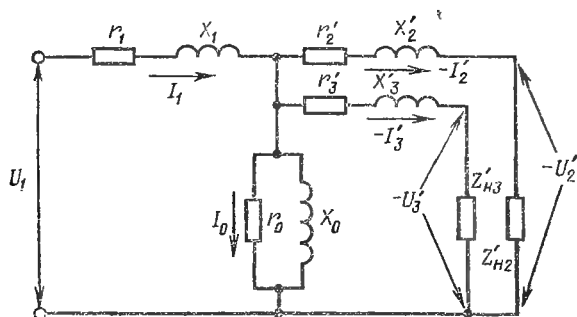


Рис. 16.3. Эквивалентная схема трехобмоточного трансформатора

обмотки могут располагаться различным образом (рис. 16.4). Ближе к стержню может быть расположена обмотка НН (а), СН (б) или ВН (в). Расположение обмотки ВН (в) близ стержня нецелесообразно, так как изоляция ее от магнитопровода представляет большую сложность. Также из конструктивных соображений не располагают обмотки ВН между обмотками СН и НН (г), так как при таком расположении требовалось бы изолировать обмотку ВН от двух других. При расположении обмотки ВН на периферии (а и б) индуктивные сопротивления рассеяния и напряжения к.з. между обмотками ВН и какой-либо другой (СН и НН) будут меньше для той обмотки, которая расположена ближе к обмотке ВН.

Номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора называют мощность его наиболее мощной обмотки, которой всегда является обмотка ВН. Изготовление трехобмоточного трансформатора в случае, когда мощность одной из вторичных обмоток его невелика, неэкономично. Поэтому мощности обмоток ВН, СН и НН трехобмоточного трансформатора в процентах от его номинальной обычно составляют: 1) 100, 100, 100; 2) 100, 100, 66, 7; 3) 100, 66, 7, 100; 4) 100, 66, 7, 66, 7.

Трехфазные трансформаторы также выполняют трехобмоточными либо с соединением обмоток ВН и СН в звезду, а обмотки НН в треугольник, либо с соединением обмотки ВН в звезду, а обмоток СН и НН в треугольник. Схемы соединения обмоток, диаграммы

векторов фазных э. д. с. и условные обозначения трехфазных трех-обмоточных трансформаторов приведены на рис. 16.5.

Трехобмоточные трансформаторы обычно строят на большие мощности 5600—31 500 кВ·А (трехфазные) и 5000—40 000 кВ·А (однофазные) при напряжении обмоток ВН—110—121 кВ, СН—34,5—38,5 кВ и НН—3,15—15,75 кВ.

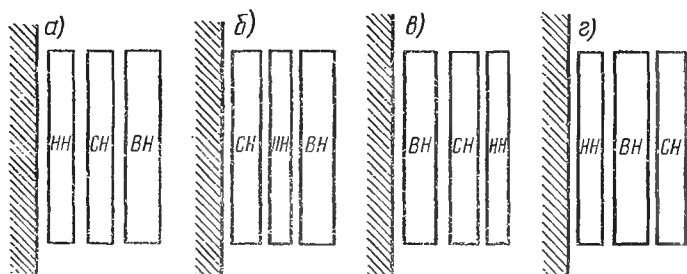


Рис. 16.4. Размещение обмоток трехобмоточного трансформатора на магнитопроводе

Схемы соединения обмоток			Диаграммы векторов			Условные обозначения
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	

Рис. 16.5. Схемы соединения обмоток, диаграммы векторов фазных э. д. с. и условные обозначения трехфазных трехобмоточных трансформаторов

В некоторых случаях на крупных электрических станциях, когда возникает необходимость в работе двух (или трех) генераторов на общую линию электропередачи через один мощный повышающий трансформатор, применяют трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмотками. Иногда трансформаторы имеют две первичные обмотки с различными номинальными напряжениями.

§ 16.3. Сварочные трансформаторы

Сварочные трансформаторы применяют для контактной и дуговой электросварки. Короткое замыкание вторичной обмотки трансформатора является нормальным режимом работы при контактной сварке (при соприкосновении электродов) и часто возникает при дуговой. Для ограничения токов к. з. сварочные трансформаторы строят с большим индуктивным сопротивлением и сравнительно низким коэффициентом мощности. Увеличение индуктивного сопротивления обмоток сварочного трансформатора может быть достигнуто либо применением специальной конструкции обмоток, либо включением дополнительной индуктивности в цепь вторичной (или первичной) обмотки. Увеличение индуктивных сопротив-

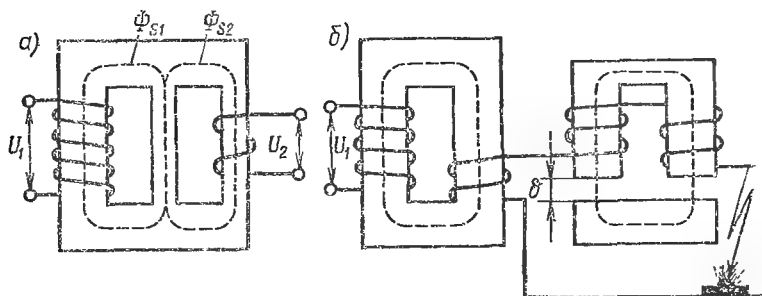


Рис. 16.6. Схемы устройства сварочных трансформаторов

лений обмоток в самом трансформаторе достигается увеличением потоков рассеяния, для чего обмотки трансформатора размещают на разных стержнях магнитопровода или в различных местах по высоте стержня. Включение магнитных шунтов в магнитопровод (рис. 16.6, а) также резко увеличивает потоки рассеяния и индуктивное сопротивление обмоток трансформатора. Трансформаторы для контактной сварки делают со вторичной обмоткой, состоящей из одного витка, напряжение на которой обычно не превышает 14 В. Для регулирования тока, протекающего через свариваемую деталь, первичная обмотка сварочного трансформатора имеет несколько выводов, переключение которых позволяет изменять число витков обмотки.

В настоящее время наиболее широкое распространение имеют сварочные трансформаторы, предназначенные для дуговой электросварки. Такие трансформаторы строят на вторичное напряжение 60÷70 В (напряжение зажигания дуги). Особенностью работы этих трансформаторов является прерывистый режим работы с резкими переходами от холостого хода к короткому замыканию и обратно. Для устойчивого и непрерывного горения дуги необходимы незначительные изменения тока и значительная индуктивность в сварочных цепях. Для регулирования тока в сварочной цепи последовательно со вторичной обмоткой трансформатора включают индуктивную катушку со стальным магнитопроводом (рис. 16.6, б). Величина сварочного тока зависит от диаметра электрода и регулируется реактивным сопротивлением индуктивной катушки, которое зависит от величины воздушного зазора δ. Увеличение воздушного зазора в магнитопроводе индуктивной катушки вызывает уменьшение ее реактивного сопротивления, вследствие чего ток в сварочной цепи повышается. Иногда индуктивные катушки совмещают в одно целое со сварочным трансформатором.

§ 16.4. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы применяют в установках переменного тока для изоляции цепей измерительных приборов и реле от сети высокого напряжения и для расширения пределов измерения измерительных приборов. Непосредствен-

ное включение измерительных приборов в цепь высокого напряжения сделало бы приборы опасными для прикосновения. Конструкция приборов в этом случае была бы сильно усложнена, так как изоляция токоведущих частей должна была бы быть рассчитана на высокое напряжение, а их сечение — на большие токи. Измерительные трансформаторы делят на трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Их применение дает возможность пользоваться одними и теми же приборами со стандартными пределами измерения для измерения самых различных напряжений и токов. Трансформаторы тока преобразуют измеряемый большой ток в малый, а трансформаторы напряжения — измеряемое высокое напряжение в низкое.

Трансформаторы тока. Первичную обмотку трансформатора тока, имеющую малое число витков, включают последовательно в линию, в которой измеряют или контролируют ток (рис. 16.7, а). Начало и конец этой обмотки обозначают бук-

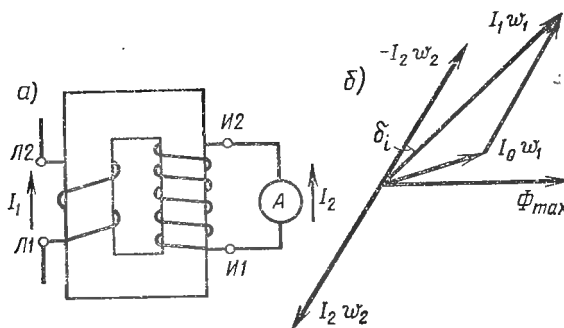


Рис. 16.7. Схема включения (а) и векторная диаграмма намагничивающих сил (б) трансформаторов тока

вами $L1$ и $L2$ (линия) соответственно, начало и конец вторичной обмотки — буквами $I1$ и $I2$ (измерение). В цепь вторичной обмотки трансформатора тока включают прибор с малым сопротивлением. Им может быть амперметр, токовая катушка ваттметра, счетчика, какого-либо иного измерительного прибора или реле. Приборы во вторичную цепь включают так, чтобы положительное направление тока в приборе по направлению совпадало с положительным направлением тока в контролируемой цепи. Это очень важно для включения ваттметров и счетчиков при измерении мощности и энергии.

Первичные номинальные токи трансформаторов тока стандартизованы в пределах $5 \div 15\,000$ А, для вторичных номинальных токов — 5 А, а в специальных случаях — 1 А. В цепь вторичной обмотки трансформатора тока можно включить несколько приборов, которые следует соединить последовательно, чтобы через них проходил один и тот же ток. Однако включение в цепь вторичной обмотки большого числа измерительных приборов нежелательно, так как это ведет к увеличению сопротивления нагрузки трансформатора и снижает точность измерения. Сопротивление нагрузки, включаемой в цепь вторичной обмотки трансформатора тока при номинальном токе 5 А, должно быть не более $0,2 \div 2$ Ом.

Условия работы трансформатора тока близки к короткому замыканию вторичной обмотки силового трансформатора. Так как сопротивление нагрузки очень мало, то и напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора тока также мало. Следовательно, мала как э. д. с. вторичной обмотки, так и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора, необходимый для индуктирования этой э. д. с. Поэтому намагничивающий ток будет относительно мал и н. с. первичной и вторичной обмоток практически взаимно уравновешены, т. е. $I_1 w_1 = I_2 w_2$. Зная коэффициент трансформации трансформатора тока, т. е. отношение чисел витков вторичной и первичной обмоток ($k_i = w_2 / w_1$) по показанию амперметра во вторичной цепи, легко определить ток в первичной контролируемой цепи.

При увеличении сопротивления нагрузки внешней нагрузкой повышается напряженность на зажимах вторичной обмотки трансформатора тока, э. д. с. во вторичной обмотке и магнитный поток в магнитопроводе. Для создания большого магнитного потока требуется больший намагничивающий ток, что приводит к большим погрешностям при измерении, так как нарушается равновесие н. с. первичной и вторичной обмоток ($I_1 w_1 \neq I_2 w_2$).

Соответствующую неточность в передаче значения измеряемого тока называют **токовой погрешностью**:
$$f_I = \frac{I_2 w_2 / w_1 - I_1}{I_1} 100\%,$$

допустимое значение которой для трансформаторов тока классов точности 0,2; 0,5; 1; 3; 10 соответственно будет 0,2; 0,5; 1; 3; 10% при номинальном первичном токе.

Кроме того, возникает неточность в показаниях ваттметров и счетчиков из-за угловой погрешности δ_1 , которая определяется углом между векторами н. с. $I_1 w_1$ и $-I_2 w_2$ в минутах (рис. 16.7, б). Если вектор $-I_2 w_2$ опережает вектор $I_1 w_1$, то угловая погрешность считается положительной. Для трансформаторов тока классов точности 0,2; 0,5 и 1 угловая погрешность при номинальном токе не должна превышать соответственно 10, 40 и 80 мин, для трансформаторов тока классов точности 3 и 10 угловая погрешность не нормирована. С увеличением намагничивающего тока увеличивается как токовая, так и угловая погрешность.

У точных трансформаторов тока н. с. первичной обмотки при номинальном токе должна быть не менее 500 А. Число витков первичной обмотки выбирают в зависимости от номинального первичного тока и требуемой точности. Трансформаторы тока могут быть одновитковыми (первичная обмотка имеет один виток), шинными (первичной обмоткой служит шина распределительного устройства) и многovitковыми (первичная обмотка имеет два и более витков).

Трансформаторы тока изготовляют сухими с изоляцией из бакелизированной бумаги, с керамической изоляцией, а также с эпоксидной изоляцией. При весьма высоких напряжениях применяют масляные трансформаторы тока.

Разновидностью шинных трансформаторов тока являются измерительные клещи, которые служат для ориентировочных измерений токов от 20 до 1000 А при рабочем напряжении до 10 кВ. Магнитопровод клещей, изготовленный из листовой стали, состоит из двух половин, оттягиваемых сильною пружиной. Клещи раскрывают для введения провода, в котором нужно измерить ток. Этот провод является первичной обмоткой трансформатора тока. Вторичная обмотка расположена на магнитопроводе и замкнута на амперметр, установленный на клещах. Рукоятки отделены от высокого напряжения фарфоровыми изоляторами и для безопасности обслуживания заземлены. В случае пробоя изоляции между обмотками трансформатора тока вторичная обмотка окажется под высоким напряжением; в случае пробоя обмотки высокого напряжения на корпус под высоким напряжением окажется магнитопровод. Для безопасности обслуживания трансформаторов тока их вторичные обмотки и магнитопроводы заземляют.

Особенностью трансформаторов тока является то, что при их работе нельзя размыкать вторичную цепь, когда ток в ней становится равным нулю, а в первичной остается неизменным. Намагничивающая сила первичной обмотки трансформатора тока, не встречая противоположно направленной н. с. вторичной

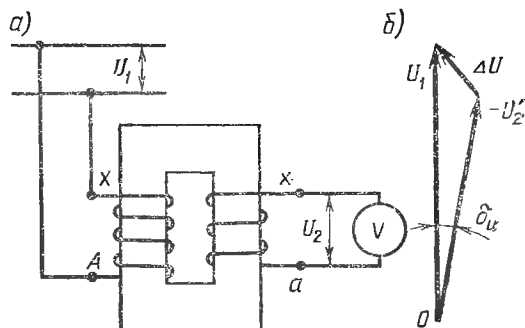


Рис. 16.8. Схема включения (а) и векторная диаграмма напряжений (б) трансформатора напряжения

обмотки, создает в магнитопроводе очень большой магнитный поток, индуцирующий во вторичной обмотке очень большую э. д. с. (до нескольких киловольт). Такая э. д. с. опасна для жизни человека и может вызвать пробой изоляции вторичной обмотки. Кроме того, большой магнитный поток в магнитопроводе значительно увеличивает потери в стали, что вызывает нагрев магнитопровода, опасный для целостности изоляции.

Трансформаторы напряжения. По устройству они подобны силовым трансформаторам небольшой мощности. Первичную обмотку трансформатора напряжения с большим числом витков включают в сеть, напряжения в которой измеряют или контролируют (рис. 16.8, а). Начало и конец первичной обмотки обозначаются буквами А и Х. Вторичная обмотка с меньшим числом витков замыкается на прибор с большим сопротивлением. Таким прибором может быть вольтметр, параллельная обмотка ваттметра, счетчика или какого-либо иного измерительного прибора или реле. Их сопротивления сравнительно велики (тысячи Ом), поэтому ток в цепи вторичной обмотки трансформаторов напряжения весьма мал и режим работы его близок к режиму холостого хода силового трансформатора. Начало и конец вторичной обмотки обозначается буквами а и х. По отношению к измерительному прибору вторичное напряжение должно совпадать по фазе с первичным, что достигается соответствующим соединением вторичной обмотки с прибором. Это необходимо при измерениях мощности и энергии.

Так как при малых токах в обмотках трансформатора падения напряжения в сопротивлениях этих обмоток также малы, напряжения на зажимах первичной и вторичной обмоток практически равны э. д. с., а отношение этих напряжений равно коэффициенту трансформации

$$k_u = U_1/U_2 = E_1/E_2 = 4,44\omega_1 f \Phi_{\max} / (4,44\omega_2 f \Phi_{\max}) = \omega_1/\omega_2.$$

Зная коэффициент трансформации по показаниям приборов низкого напряжения вторичной цепи, легко определить измеряемое высокое напряжение: $U_1 = U_2 k_u = U_2 \omega_1/\omega_2$.

В действительности токи в обмотках трансформатора напряжения не равны нулю. Поэтому за счет падения напряжения в сопротивлениях обмоток напряжение не равно э. д. с. Это является причиной неточности измерения, которая

называется погрешностью напряжения
$$f_u = \frac{U_2 \omega_1/\omega_2 - U_1}{U_1} 100\%.$$

Для трансформаторов напряжения различных классов точности 0,5; 1; 3 устанавливается следующая допустимая погрешность напряжения соответственно $\pm 0,5\%$; $\pm 1\%$; $\pm 3\%$. Кроме того, за счет падения напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора возникает неточность в передаче фазы напряжения — угловая погрешность δ_u . Падение напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора ΔU приводит к тому, что векторы напряжений первичной обмотки U_1 и приведенного напряжения вторичной обмотки с обратным знаком не совпадают (рис. 16.8, б). Угол между этими векторами δ_u определяет угловую погрешность, измеряемую в угловых минутах и влияющую на показания ваттметров, счетчиков и фазометров. Угловая погрешность считается положительной, если вектор $-U_2'$ опережает вектор U_1 .

Для трансформаторов напряжения классов точности 0,5 и 1 допускается угловая погрешность соответственно ± 20 и ± 40 мин. Для трансформаторов напряжения класса точности 3 угловая погрешность не нормирована.

В цепи вторичной обмотки трансформатора напряжения могут быть включены помимо вольтметра параллельные обмотки ваттметра, счетчика и др. Все эти приборы соединяют параллельно, чтобы на них воздействовало одно и то же напряжение. Включение большого числа приборов в цепь вторичной обмотки трансформатора напряжения вызывает увеличение токов в обмотках и увеличивает погрешность при измерении. Поэтому общая полная мощность присоединенных ко вторичной обмотке приборов не должна превышать измерительную мощность трансформатора напряжения, на щитке которого указывается наибольшая допустимая мощность нагрузки в вольтамперах.

Для напряжения до 6 кВ трансформаторы напряжения изготовляют сухими, т. е. с естественным воздушным охлаждением; для напряжений выше 6 кВ применяют масляные.

Трансформаторы напряжения могут быть трехфазными, имеющими такое же обозначение зажимов, как и у обычных силовых.

Для безопасности обслуживания и для большей надежности работы аппаратуры магнитопровод трансформатора напряжения и один зажим вторичной обмотки заземляют.

§ 16.5. Трансформаторы с регулируемым напряжением

В устройствах автоматического регулирования и управления, в схемах совместной работы нескольких сетей для пусков асинхронных двигателей и регулирования их частоты вращения и во многих других случаях необходимо регули-

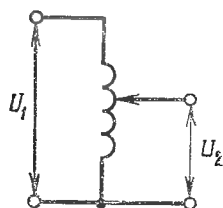


Рис. 16.9. Принципиальная схема ЛАТР

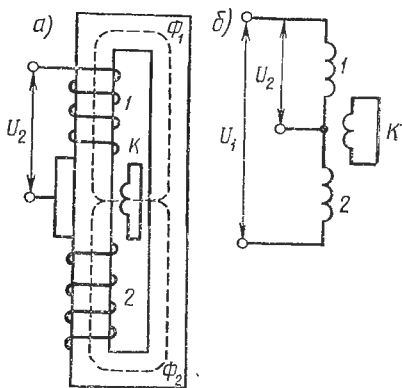


Рис. 16.10. Принципиальная схема устройства трансформатора с подвижной короткозамкнутой катушкой (а) и схема соединения его обмоток (б)

руемое напряжение. Наиболее простым способом изменения вторичного напряжения трансформатора или автотрансформатора является изменение числа витков обмотки, для чего на обмотке делают несколько отводов. С помощью переключателя изменяется число витков обмотки, а следовательно, и вторичное напряжение трансформатора или автотрансформатора. Недостаток такого способа изменения напряжения — необходимость отключения трансформатора от сети. Если бы мы начали производить регулирование напряжения под нагрузкой, то при изменении числа витков обмотки трансформатора часть витков оказалась бы замкнутыми накоротко, что повело бы к созданию чрезмерно больших токов и к выходу трансформатора из строя. Для ограничения токов к. з. на время переключения витков в цепь короткозамкнутых витков вводят активные или реактивные сопротивления. Существует ряд схем, позволяющих ограничить токи короткозамкнутых витков. Однако такие регуляторы очень громоздки и находят применение в трансформаторах большой мощности.

Ограничение токов короткозамкнутых витков при регулировании напряжения используется в ЛАТР (лабораторном автотрансформаторе регулируемом), который представляет собой автотрансформатор, часть витков обмотки которого оголена, а по оголенным проводникам перемещается угольная щетка (рис. 16.9). Угольную щетку выполняют такой ширины, чтобы она могла перекрывать не более двух проводников, т. е. чтобы не более одного витка замыкалось щеткой накоротко. Большое переходное сопротивление между проводниками обмотки ЛАТРа и угольной щеткой ограничивает ток короткозамкнутого витка, ЛАТРы применяют в схемах электропитания радиоустройств, в лабораторном оборудовании и др.

Регулирование вторичное напряжение трансформатора можно не только изменением числа витков обмотки (первичной или вторичной), но и изменение магнитного потока, для чего используют либо перемещаемые катушки, либо подвижные магнитопроводы трансформаторов. Наиболее часто регулирование напряжения под нагрузкой обеспечивает трансформатор с подвижной короткозамкнутой катушкой (трансформатор Норриса), который позволяет равномерно изменять напряжение на выходе в широких пределах. Трансформатор с короткозамкнутой катушкой имеет удлиненный стальной сердечник с узким окном (рис. 16.10, а). Чаще трансформатор выполняют по схеме автотрансформатора (рис. 16.10, б). На сердечнике размещена обмотка трансформатора, состоящая из двух катушек 1 и 2 с одинаковым числом витков, одна из катушек (катушка 1) является и вторичной обмоткой трансформатора. Катушки 1 и 2 намотаны встречно так, что магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , создаваемые токами этих катушек, в любой момент времени равны и направлены встречно. Поэтому по сердечнику они замыкаться не могут и вынуждены замыкаться через воздушное пространство в средней части окна. Поверх обмоток 1 и 2 намотана короткозамкнутая катушка К, которая может перемещаться по высоте стержня от крайнего нижнего до крайнего верхнего положения. Если катушка К находится в средней части между катушками 1 и 2, то она не сцеплена с магнитными линиями потоков Φ_1 и Φ_2 и не оказывает никакого влияния на эти катушки. Следовательно, в этом случае приложенное напряжение уравнивается противоэлектродвижущими силами катушек 1 и 2 (если пренебрегать падением напряжения в сопротивлениях этих катушек), т. е. $U_1 = -E_1 - E_2$.

Катушки 1 и 2 находятся в одинаковых магнитных условиях, следовательно, их э. д. с. равны, т. е. $E_1 = E_2$ и $E_1 = U_1/2$.

Вторичное напряжение, примерно равное э. д. с. катушки 1, в рассматриваемом случае меньше приложенного напряжения, т. е. $U_2 = E_1 \approx U_1/2$.

Если мы переместим короткозамкнутую катушку в крайнее нижнее положение, то витки этой обмотки будут сцеплены со всем потоком Φ_2 , что поведет к значительному его уменьшению, и э. д. с. катушки 2 также уменьшится до малой величины. Для упрощения дальнейшего рассмотрения примем, что э. д. с. катушки 2 при крайнем нижнем положении короткозамкнутой катушки уменьшится до 0, т. е. $E_2 = 0$. Тогда $U_1 = -E_1$, т. е. вторичное напряжение равно первичному $U_2 = E_1 \approx U_1$.

При положении короткозамкнутой катушки в какой-либо промежуточной точке между серединой стержня и крайнем нижнем положении не будет полной компенсации потока Φ_2 и $E_2 \neq 0$, так что вторичное напряжение будет меньше напряжения сети. Изменением положения короткозамкнутой катушки от среднего по высоте стержня до крайнего нижнего положения можно получить на выходе регулятора любое напряжение от $0,5U_1$ до U_1 . Если короткозамкнутая катушка находится в крайнем верхнем положении и сцеплена со всем потоком Φ_1 , то $E_1 \approx 0$, так что вторичное напряжение $U_2 \approx E_1 = 0$. Если короткозамкнутая катушка находится в какой-либо промежуточной точке между средним и крайним верхним положением по высоте, то полной компенсации потока Φ_1 не будет и выходное напряжение не равно нулю. Таким образом, перемещая короткозамкнутую катушку от середины до крайнего верхнего положения по высоте стержня на выходе регулятора мы можем получить любое напряжение от $0,5U_1$ до 0.

Достоинство регулятора — равномерное изменение выходного напряжения. Такие трансформаторы применяют в электропитающих устройствах радиосвязи для регулирования напряжения накала ламп и анодного напряжения выпрямительных устройств, а также в ряде специальных электроустановок. Так, например, трансформаторы с короткозамкнутой катушкой установлены для регулирования напряжения накала ламп для звезд Московского Кремля.

Следовательно, в зависимости от положения короткозамкнутой катушки вторичное напряжение трансформатора может быть изменено от 0 до U_1 . Перемещается катушка К по сердечнику с помощью червячной передачи.

Недостатки такого трансформатора — большой намагничивающий ток, большие индуктивные сопротивления обмоток и низкий коэффициент мощности — $\cos \varphi$.

§ 16.6. Пиктрансформаторы

Пиктрансформаторы применяют для преобразования синусоидальной формы кривой напряжения сети переменного тока в напряжение острой пикообразной формы в схемах выпрямления, инвертирования, автоматического регулирования и управления для регулирования фазы напряжения, подаваемого на сетку тиратрона, или для питания зажигающего игнитрона, а также используют как генераторы высших гармоник в многоканальной связи.

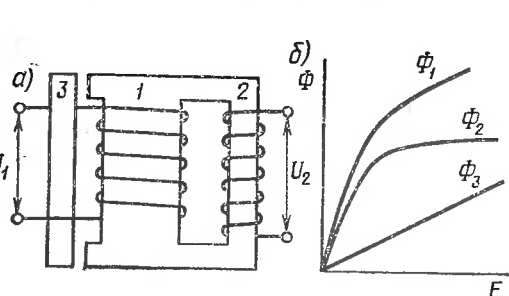


Рис. 16.11. Схема устройства (а) и магнитные характеристики стержней пиктрансформатора (б)

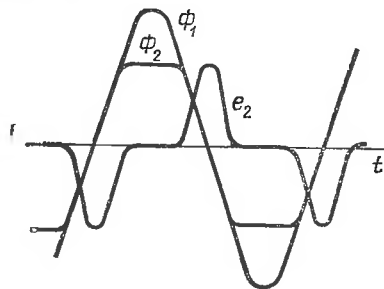


Рис. 16.12. Кривые изменения во времени магнитных потоков в стержнях и э. д. с. вторичной обмотки пиктрансформатора

Форма кривой вторичного напряжения зависит от кривой магнитного потока. Для получения пикообразной формы кривой э. д. с. вторичной обмотки трансформатора магнитный поток, с которым сцеплена эта обмотка, должен иметь трапецевидную зависимость.

Пиктрансформатор имеет сердечник, состоящий из трех стержней (рис. 16.11, а): 1 не насыщен и на нем помещена первичная обмотка пиктрансформатора, 2 насыщен и на нем помещена вторичная обмотка пиктрансформатора, 3 является магнитным шунтом и отделен от сердечника воздушным зазором. Магнитный поток стержня 1 частично замыкается через стержни 2 и 3 и равен сумме магнитных потоков: $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$. На рис. 16.11, б показаны магнитные характеристики трех стержней сердечника. Если приложенное напряжение U_1 синусоидально, то и магнитный поток стержня 1 синусоидален (кривая Φ_1 на рис. 16.12). При слабых магнитных полях магнитное сопротивление стержня 2 значительно меньше магнитного сопротивления стержня 3, так что большая часть магнитного потока Φ_1 замкнется через стержень 2. В насыщенном режиме магнитное сопротивление стержня 2 возрастает и увеличение магнитного потока Φ_2 прекращается. Э. д. с. вторичной обмотки $e_2 = -w_2(d\Phi_2/dt)$. Таким образом, форма кривой э. д. с. обмотки 2 — производная по времени от потока Φ_2 с обратным знаком.

ЛИТЕРАТУРА

- Арменский Е. В., Фалк Г. Б. Электрические микромашины. — М.: Высшая школа, 1968.
- Ермолин Н. П. Электрические машины. — М.: Высшая школа, 1975.
- Каляева А. А., Мазур А. Я. Электрические машины. — М.: Высшая школа, 1971.
- Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины, ч. II. — М.: Энергия, 1973.
- Пиотровский Л. М. Электрические машины. — М.: Энергия, 1972.
- Сергеев П. С. Электрические машины. — М.: Госэнергоиздат, 1962.
- Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств. — М.: Высшая школа, 1976.
- Яковлев Г. С., Магаршак Б. Г., Маникин А. И. Судовые электрические машины. — М.: Судостроение, 1972.

Предисловие	3
Введение	
§ В.1. Краткие исторические сведения об электрических машинах и трансформаторах	4
§ В.2. Общие сведения об электрических машинах и трансформаторах	7
§ В.3. Материалы, применяемые для электрических машин и трансформаторов	9
§ В.4. Нагревание и охлаждение электрических машин и трансформаторов	12

Раздел I

Машины постоянного тока

Глава 1. Принцип действия и устройство электрических машин постоянного тока	14
§ 1.1. Принцип действия машин постоянного тока	14
§ 1.2. Устройство и основные элементы конструкции машины постоянного тока	17
§ 1.3. Системы вентиляции электрических машин	20
Глава 2. Якорные обмотки машин постоянного тока	22
§ 2.1. Устройство обмоток	22
§ 2.2. Петлевая обмотка	25
§ 2.3. Волновая обмотка	28
§ 2.4. Условия симметрии обмоток	31
§ 2.5. Уравнительные соединения	32
§ 2.6. Обмотка смешанного типа	34
§ 2.7. Электродвижущая сила обмотки якоря	35
§ 2.8. Сравнительные характеристики обмоток различных типов	37
Глава 3. Магнитная цепь машины постоянного тока	37
§ 3.1. Порядок расчета магнитной цепи электрической машины	37
§ 3.2. Характеристика намагничивания машины	42
Глава 4. Реакция якоря машины постоянного тока	43
§ 4.1. Понятие о реакции якоря	43
§ 4.2. Поперечная и продольная намагничивающие силы якоря	45
§ 4.3. Реакция якоря	46
Глава 5. Коммутация	48
§ 5.1. Сущность процесса коммутации	48
§ 5.2. Замедленная и ускоренная коммутации	51
§ 5.3. Причины искрения щеток	53
§ 5.4. Основные средства улучшения коммутации	54
§ 5.5. Коммутационная реакция якоря	58
§ 5.6. Экспериментальная проверка и наладка коммутации	59
§ 5.7. Средства уменьшения радиопомех	61
Глава 6. Генераторы постоянного тока	61
§ 6.1. Общие сведения о генераторах постоянного тока	61
§ 6.2. Генератор независимого возбуждения	64

§ 6.3. Генератор параллельного возбуждения	68
§ 6.4. Генератор последовательного возбуждения	71
§ 6.5. Генератор смешанного возбуждения	72
§ 6.6. Параллельная работа генераторов постоянного тока . .	73
Глава 7. Двигатели постоянного тока	76
§ 7.1. Общие сведения о двигателях постоянного тока	76
§ 7.2. Классификация и характеристики двигателей постоян- ного тока	78
§ 7.3. Двигатель параллельного возбуждения	80
§ 7.4. Двигатель последовательного возбуждения	84
§ 7.5. Двигатель смешанного возбуждения	85
Глава 8. Потери в электрических машинах постоянного тока и коэффи- циент полезного действия	88
§ 8.1. Виды потерь	88
§ 8.2. Коэффициент полезного действия	89
Глава 9. Специальные машины постоянного тока	90
§ 9.1. Электромашинные усилители	90
§ 9.2. Машины постоянного тока с беспазовым якорем	93
§ 9.3. Униполярные машины	94
§ 9.4. Исполнительные двигатели	94
§ 9.5. Тахогенераторы	96
§ 9.6. Тяговые электродвигатели	96

Раздел II

Трансформаторы

Глава 10. Принцип действия и устройство трансформаторов	98
§ 10.1. Назначение и принцип действия трансформаторов . .	98
§ 10.2. Устройство магнитопроводов однофазных трансфор- маторов	102
§ 10.3. Устройство обмоток трансформаторов	105
§ 10.4. Магнитные потоки и э. д. с. обмоток трансформатора	107
Глава 11. Холостой ход трансформатора	110
§ 11.1. Опыт холостого хода трансформатора	110
§ 11.2. Ток холостого хода	112
§ 11.3. Векторная диаграмма и эквивалентная схема транс- форматора при холостом ходе	114
Глава 12. Рабочий процесс трансформатора	116
§ 12.1. Равновесие намагничивающих сил обмоток трансфор- матора	116
§ 12.2. Векторная диаграмма и эквивалентная схема транс- форматора при нагрузке	117
§ 12.3. Опыт короткого замыкания трансформатора	121
§ 12.4. Процентное понижение вторичного напряжения транс- форматора при нагрузке	126
§ 12.5. Коэффициент полезного действия трансформатора . .	128
§ 12.6. Рассеяние в трансформаторах	130
§ 12.7. Регулирование напряжения трансформатора	132
§ 12.8. Нагревание и охлаждение трансформаторов	134
Глава 13. Трехфазные трансформаторы	139
§ 13.1. Магнитопроводы трехфазных трансформаторов	139
§ 13.2. Соединение обмоток трехфазных трансформаторов . .	141
§ 13.3. Группы трехфазных трансформаторов	143
§ 13.4. Третьи гармоники в кривых токах холостого хода, маг- нитного потока и электродвижущих сил	146
§ 13.5. Работа трансформатора при несимметричной нагрузке	149
Глава 14. Параллельная работа трансформаторов	152
§ 14.1. Назначение параллельной работы трансформаторов . .	152

	§ 14.2. Условия включения трансформаторов на параллельную работу	153
Глава 15.	Переходные процессы в трансформаторах	157
	§ 15.1. Процессы при включении трансформаторов	157
	§ 15.2. Процессы при внезапных коротких замыканиях трансформаторов	161
	§ 15.3. Перенапряжения в трансформаторах	162
Глава 16.	Трансформаторы специальных типов	168
	§ 16.1. Автотрансформаторы	168
	§ 16.2. Трехобмоточные трансформаторы	171
	§ 16.3. Сварочные трансформаторы	175
	§ 16.4. Измерительные трансформаторы	175
	§ 16.5. Трансформаторы с регулируемым напряжением	179
	§ 16.6. Пикттрансформаторы	181
Литература		181

*Валентин Евгеньевич Китаев,
Юрий Михайлович Корхов,
Владимир Константинович Свирин*

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть I

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Редактор В. И. Петухова. Художник В. З. Казакевич. Художественный редактор Н. К. Гуторов. Технический редактор Н. А. Битюкова. Корректор С. К. Марченко

ИБ № 1074

Изд. № STD-269 Сдано в набор 10.03.78. Подп. в печать 17.07.78. Т-10168.
Формат 60×90¹/₁₆. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 11,5
усл. п. л. 12,23 уч.-изд. л. Тираж 40 000 экз. Зак. № 300. Цена 40 коп.
Издательство «Высшая школа»,
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
Хохловский пер., 7.